



Bruno Miguel de Sousa Videira

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Verificação da Aplicabilidade da
Técnica *Structure From Motion* na
Modelação 3D de Componentes
Mecânicos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Rui Fernando Martins, Professor
Auxiliar, FCT/UNL – DEMI

Co-orientador: Doutor António Manuel Flores Romão de
Azevedo Gonçalves Coelho, Professor Catedrático,
FCT/UNL – DEMI



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2016

Verificação da Aplicabilidade da Técnica *Structure From Motion* na Modelação 3D de Componentes Mecânicos

Copyright 2016 © Bruno Miguel de Sousa Videira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer em especial à minha mãe e aos meus irmãos por estarem ao meu lado perante os desafios que foram surgindo durante o meu percurso académico, apoiando-me de forma incondicional.

Ao Professor Doutor Rui Fernando Martins pela sua constante disponibilidade e auxílio, guiando-me na realização deste estudo, e por me ter aceitado como seu orientando. Também o meu agradecimento ao Professor Doutor Gonçalves Coelho que surgiu com este tema de projecto, e pela sua ajuda na área da fotografia e a sua amabilidade em emprestar o seu equipamento fotográfico pessoal, indispensáveis para a execução deste trabalho.

Por último, um obrigado a todos os meus colegas e amigos nesta jornada da minha vida, em especial ao Bruno Morais e ao Celso Almeida, que me ajudaram sempre que necessitei, e que de forma humilde e altruísta me estenderam a mão sem hesitar.

Resumo

É cada vez mais recorrente a aplicação do processo de engenharia inversa em diversas áreas, principalmente na engenharia. A possibilidade de recolher informação e conhecimento acerca do funcionamento e design de projecto de um componente acabado, revela-se uma vantagem na procura de melhores soluções.

O presente trabalho tem como intuito verificar se, através da técnica *Structure from Motion* (também conhecida por *Surface from Motion*), é possível modelar tridimensionalmente componentes mecânicos, usando apenas para a aquisição de dados um equipamento fotográfico convencional. Recorrendo a dois programas computacionais para o efeito, o *Agisoft PhotoScan* e o *Regard3D*, respectivamente na sua versão de teste e versão gratuita, é descrito o seu procedimento de utilização, e testados os vários parâmetros de funcionamento, comparando as dimensões das cotas dos modelos obtidos com os valores das cotas medidas nas peças reais através de paquímetro. Após a análise cuidadosa dos desvios das dimensões, são indicados os valores dos parâmetros a seleccionar, de forma a que os modelos tridimensionais sejam os mais similares possíveis às peças reais.

Os resultados obtidos permitem concluir que para as peças utilizadas, aquelas que possuem uma espessura mais reduzida – 1.08 mm e 2.46 mm – não é possível almejar uma reconstrução de modelos completos, enquanto que para as peças de maiores dimensões, consegue-se o objectivo de modelos que representam as superfícies na sua totalidade. De todas as cotas medidas, o valor mais elevado do desvio foi de 4.31 mm e registado na cota de maior comprimento (143.24 mm). Percentualmente, o maior desvio verificado foi de 28.40%, mais precisamente um desvio de 0.94 mm em relação ao valor real (3.31 mm). Por fim, a utilização do *Agisoft PhotoScan* origina modelos mais próximos da realidade, com pouco ruído e através de um processo muito mais simples e optimizado em comparação com a utilização do *Regard3D*.

Palavras-chave:

Structure from Motion

Modelos Tridimensionais

Engenharia Inversa

Nuvem de Pontos

Abstract

Nowadays, it is more often the application of the reverse engineering process in several fields, especially in engineering. The possibility to collect information and knowledge about the project design of a component already made, it is an advantage in the search for better solutions.

This work intend to investigate if, by a *Structure from Motion* technique (also known as *Surface from Motion*), is possible to create a three-dimensional model of a mechanic component, using only a conventional photographic equipment. With the aid of two computer programs for this purpose, the Agisoft PhotoScan and the Regard3D, respectively in its trial version and free version, it is explained the work procedure and are tested the several operating parameters, by comparing the dimensions of the obtained models with the dimension values measured on the actual parts by a digital caliper. After a careful analysis of the dimension deviations, the parameters values are set, so that the three-dimensional models are the most similar as possible to the real parts.

The results obtained allow to conclude that for the parts used, those with a reduced thickness - 1.08 mm and 2.46 mm - it is not possible to aim for a full reconstruction models, whereas for the larger pieces, the objective is achieved and the parts are entirely modelled. Of all dimensions measured, the highest deviation value was 4.31 mm and registered in the longest dimension (143.24 mm). In percent terms, the highest deviation verified was 28.40%, more precisely a deviation of 0.94mm from the actual value (3.31 mm). Finally, the use of *Agisoft PhotoScan* creates models closer to reality, with low noise and through a much simpler and optimized process compared to the use of *Regard3D*.

Key-words:

Structure from Motion

Three-dimensional models

Reverse engineering

Point cloud

Índice de Matérias

1.	Introdução	1
1.1.	Contexto e Motivação	1
1.2.	Objectivos.....	2
1.3.	Estrutura da Dissertação	2
2.	Engenharia Inversa	5
2.1.	Introdução	5
2.2.	Engenharia Inversa ao Longo dos Tempos.....	7
2.3.	Usos Potenciais da Engenharia Inversa	11
2.4.	Conceitos e Definições da Engenharia Inversa Geométrica.....	12
2.5.	Fases da Engenharia Inversa Geométrica	16
2.5.1.	Aquisição de Dados	17
2.5.1.1.	Métodos Sem Contacto	18
2.5.1.1.1.	Métodos Ópticos	19
2.5.1.1.1.1.	Iluminação Estruturada	20
2.5.1.1.1.2.	Triangulação	21
2.5.1.1.1.3.	Tempo de Voo	24
2.5.1.1.1.4.	Interferometria de Moiré.....	26
2.5.1.1.1.5.	<i>Structure from Focus</i>	29
2.5.1.1.1.6.	<i>Structure from Defocus</i>	29
2.5.1.1.1.7.	<i>Structure from Texture</i>	30
2.5.1.1.1.8.	<i>Structure from Shading</i>	33
2.5.1.1.2.	Métodos Acústicos	34
2.5.1.1.2.1.	Sonar	34
2.5.1.1.2.2.	Ultrassonografia (2D, 3D e 4D).....	35
2.5.1.1.3.	Métodos Magnéticos	36
2.5.1.1.3.1.	Ressonância Magnética.....	36
2.5.1.1.3.2.	Tomografia Computorizada	37
2.5.1.2.	Métodos Com Contacto	38
2.5.1.3.	Métodos Destrutivos.....	39
2.5.2.	Pré-processamento	40
2.5.3.	Segmentação	44
3.	Structure from Motion	47

3.1.	Introdução	47
3.2.	Origens do Método	48
3.3.	Modelo de Projecção de Perspectiva	48
3.4.	Distorção Radial.....	52
3.5.	Correspondência	53
3.6.	Geometria em Duas Imagens	54
3.7.	Triangulação	56
3.8.	Múltiplas Vistas	58
3.9.	<i>Bundle Adjustment</i>	59
4.	Procedimento de Utilização dos Programas Computacionais de Reconstrução de Modelos 3D Utilizados.....	61
4.1.	Introdução	61
4.2.	<i>Agisoft PhotoScan</i>	62
4.2.1.	Procedimento de Utilização	63
4.3.	<i>Regard3D</i>	70
4.3.1.	Procedimento de Utilização	71
5.	Trabalho Experimental	81
5.1.	Introdução	81
5.2.	Peças.....	81
5.3.	Resultados Obtidos Pelo <i>Agisoft PhotoScan</i>	83
5.3.1.	<i>PhotoScan</i> Teste 1 – Variação do Número de Pontos-chave	84
5.3.2.	<i>PhotoScan</i> Teste 2 – Variação do Número de Pontos-nó	89
5.3.3.	<i>PhotoScan</i> Teste 3 – Variação da Precisão do Alinhamento	91
5.3.4.	<i>PhotoScan</i> Teste 4 – Variação da Precisão da Construção da Nuvem Densa	94
5.3.5.	<i>PhotoScan</i> Teste 5 – Variação da Filtragem de Profundidade	96
5.4.	Resultados Obtidos Pelo <i>Regard3D</i>	98
5.4.1.	Correspondências.....	100
5.4.1.1.	Teste 1 – Variação do Rácio de Correspondência dos Pontos-Chave	101
5.4.1.2.	Teste 2 – Variação da Sensibilidade dos Pontos-Chave	103
5.4.2.	Triangulações.....	105
5.4.2.1.	Teste 1 – Ausência de Aperfeiçoamento dos Parâmetros Intrínsecos no Método Incremental	105
5.4.2.2.	Teste 2 – Ausência de Aperfeiçoamento dos Parâmetros Intrínsecos no Método Global	106

5.4.2.3.	Teste 3 – Método Incremental e Método Global, Ambos com Aperfeiçoamento	107
5.4.3.	Densificações	108
5.4.3.1.	Teste 1 – Ausência da Opção Visibilidade	108
5.4.3.2.	Teste 2 – Método <i>CMVS/PMVS</i> e Método <i>MVE</i>	109
5.4.3.3.	Teste 3 – Alteração do Parâmetro <i>Images per Cluster</i>	110
5.4.3.4.	Teste 4 – Alteração do Parâmetro <i>Tamanho de Célula</i>	111
5.4.3.5.	Teste 5 – Alteração do Parâmetro <i>Threshold</i>	112
5.4.3.6.	Teste 6 – Alteração do Parâmetro <i>wsiz</i> e	113
5.4.3.7.	Teste 7 – Alteração do Parâmetro <i>Número Mínimo de Imagens</i>	114
5.4.3.8.	Teste 8 – Alteração do Parâmetro <i>Largura de Filtro</i>	115
5.4.4.	Superfícies	116
5.4.4.1.	Teste 1 – Alteração do Parâmetro <i>Samples per Node</i>	116
5.4.4.2.	Teste 2 – Alteração do Parâmetro <i>Point Weight</i>	117
5.4.4.3.	Teste 3 – Alteração do Parâmetro <i>Trim Threshold</i>	118
5.4.4.4.	Teste 4 – Alteração do Parâmetro <i>Confidence Threshold</i>	119
5.4.4.5.	Teste 5 – Alteração do Parâmetro <i>Minimum Component Size</i>	121
6.	Análise de Resultados.....	123
6.1.	Resultados do <i>Agisoft PhotoScan</i>	124
6.1.1.	Análise dos Resultados dos Testes	125
6.2.	Resultados do <i>Regard3D</i>	132
6.2.1.	Análise dos Resultados da Fase de Correspondência	133
6.2.2.	Análise dos Resultados da Fase de Triangulação	136
6.2.3.	Análise dos Resultados da Fase de Densificação.....	139
6.2.4.	Análise dos Resultados da Criação de Superfície	144
6.3.	Construção dos Modelos das Peças B, C e D	149
6.3.1.	Peça B	151
6.3.2.	Peça C	153
6.3.3.	Peça D	155
7.	Conclusões.....	157
7.1.	Conclusões Gerais	157
7.2.	Futuros Trabalhos.....	159
	Bibliografia.....	161
	Anexos	165

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Grande Pirâmide de Khufu (fotografia de Pichugin Dmitry)	7
Figura 2.2 – Compartimentos de Alívio da Pirâmide (imagem retirada a partir da 3D Experience da Dassault Systemes).....	8
Figura 2.3 – Basílica de São Pedro (fotografia de italia.it).....	9
Figura 2.4 – (a) Avião Americano B-29 Superfortress (fotografia de aviation-history.com);.....	10
Figura 2.5 - Nuvem de Pontos	12
Figura 2.6 - Malha Poligonal	13
Figura 2.7 - Malha antes do Processo de Remoção de Ruído	14
Figura 2.8 – A Mesma Superfície com Três Resoluções Diferentes	15
Figura 2.9 - Precisão e Exactidão	15
Figura 2.10 – Fases do Processo da Engenharia Inversa Geométrica [2]	16
Figura 2.11 - Etapas da Engenharia Inversa Geométrica(Verde – Aquisição de Dados; Azul – Pré-processamento; Amarelo – Segmentação e Montagem de Superfícies; Preto – Criação de Modelo 3D)	17
Figura 2.12 – Métodos de Aquisição de Dados	18
Figura 2.13 - Métodos de Aquisição de Dados Sem Contacto	18
Figura 2.14 - Métodos Ópticos de Aquisição de Dados.....	19
Figura 2.15 - Método da Iluminação Estruturada	20
Figura 2.16 - Diferentes Padrões de Luz dos Sistemas de Iluminação Estruturada (adaptado de [10])	21
Figura 2.17 - Método da Triangulação com uma Câmara (adaptado de [10])	22
Figura 2.18 - Método de Triangulação com Dupla Câmara (adaptado de [10])	23
Figura 2.19 - Arquitectura "Interline Transfer" das Câmaras CCD (adaptado de [13])	24
Figura 2.20 - Princípio dos Scanners de Tempo de Voo (adaptado de [10])	25
Figura 2.21 – Diagrama Sistemático para Interferometria de Moiré com Quatro Feixes (adaptado de [14])	26
Figura 2.22 - Franjas de Moiré	27
Figura 2.23 - Grelha Virtual através de Difracção e de Interferência (adaptado de [14])	28
Figura 2.24 – Formação de Imagem e Profundidade no método Structure from Defocus [17] .	30
Figura 2.25 – Structure from Texture: Representação 3D do Sistema da Câmara com o Plano Inclinado; a vista yz (b); a vista xz (c) (adaptado de [12]).....	31
Figura 2.26 - Imagem Capturada pela Câmara da Figura 2.25 (retirado de [12])	32
Figura 2.27 - Sonar	34
Figura 2.28 – Imagem de uma Ultrassonografia a 3D/4D (fotografia de babyinsight3d.com) ...	35

Figura 2.29 – Imagem de uma Ressonância Magnética 3D (imagem de gehealthcare.com)	36
Figura 2.30 – Imagem de uma Tomografia Computorizada (imagem de maxillofacial.com)	37
Figura 2.31 – Métodos Com Contacto.....	39
Figura 2.32 – Procedimento do Método Destrutivo (adaptado de [10])	40
Figura 2.33 - Interpolação Baseada nos Pixeis Vizinhos (adaptado de [19]).....	42
Figura 2.34 – Imagem Cinzenta Original e as Imagens Binárias resultantes Usando Diferentes Valores Limiares (retirado de [12])	46
Figura 3.1 - Modelo de Projecção (adaptado de [24])	49
Figura 3.2 – Semelhança de Triângulos	51
Figura 3.3 - Modelo de Projecção com Duas Imagens (adaptado de [24])	54
Figura 3.4 – Modelo da Triangulação (imagem adaptada de [24])	57
Figura 3.5 - Método Sequencial (imagem adaptada de [24])	58
Figura 4.1 – Diagrama de Processos do PhotoScan	62
Figura 4.2 – PhotoScan: Fluxo de Trabalho e Selecção de Fotografias	63
Figura 4.3 – PhotoScan: Estado das Fotografias na Árvore de Projecto	63
Figura 4.4 – PhotoScan: Marcadores do Programa.....	64
Figura 4.5 – PhotoScan: Identificação de Marcadores numa Fotografia de um Provete de Tracção Metálico, com uma Espessura de 2.46 mm	65
Figura 4.6 – PhotoScan: Ferramentas Para a Selecção da Máscara.....	65
Figura 4.7 – PhotoScan: Parâmetros do Alinhamento	66
Figura 4.8 – PhotoScan: Nuvem de Pontos Obtida e a Posição das Fotografias	67
Figura 4.9 – PhotoScan: Parâmetros de Construção da Nuvem de Pontos Densa	68
Figura 4.10 – PhotoScan: Parâmetros de Construção do Modelo	69
Figura 4.11 – PhotoScan: Modelo Tridimensional Obtido com a Configuração Máx/4000 e Precisões Médias para Todas as Etapas, e já Transformada em Sólido	69
Figura 4.12 - Diagrama de Processos do Regard3D (www.regard3d.org).....	70
Figura 4.13 – Regard3D: Selecção de Fotografias do Projecto	71
Figura 4.14 – Regard3D: Parâmetros das Correspondências	72
Figura 4.15 - Regard3D: Resultados das Correspondências.....	72
Figura 4.16 - Regard3D: Keypoints Detectados numa Imagem	73
Figura 4.17 - Regard3D: Correspondências Identificadas entre duas Imagens.....	73
Figura 4.18 - Regard3D: Parâmetros de Triangulação.....	74
Figura 4.19 – Regard3D: Resultados da Triangulação	75
Figura 4.20 - Regard3D: Triangularização dos Pontos da Superfície e das Posições da Câmara	75
Figura 4.21 – Regard3D: Parâmetros da Densificação	76

Figura 4.22 - Regard3D: Resultado da Densificação.....	78
Figura 4.23 – Regard3D: Parâmetros de Geração de Superfície	79
Figura 4.24 – Regard3D: Resultado da Superfície Final.....	80
Figura 5.1 - Identificação das Dimensões a Medir na Peça A.....	84
Figura 5.2 – PhotoScan: Visão Geral do Procedimento do Teste 1	85
Figura 5.3 – Dois Pontos Contidos num Campo de Visão	86
Figura 5.4 - Dez Medições da Cota N num Modelo.....	87
Figura 5.5 - PhotoScan: Teste 2	90
Figura 5.6 – PhotoScan: Teste 3	91
Figura 5.7 – PhotoScan: Teste 4	94
Figura 5.8 – PhotoScan: Teste 5	96
Figura 5.9 – Faces da Peça A nas Fotografias Utilizadas no Regard3D.....	98
Figura 5.10 – Ruído num Modelo Obtido pelo Regard3D	99
Figura 5.11 – Ruído nos Contornos da Superfície do Modelo Obtido pelo Regard3D.....	99
Figura 5.12 – Correspondência Teste 1	101
Figura 5.13 – Correspondência Teste 2	103
Figura 5.14 – Triangulação Teste 1.....	105
Figura 5.15 – Triangulação Teste 2.....	106
Figura 5.16 – Triangulação Teste 3.....	107
Figura 5.17 – Densificação Teste 1	108
Figura 5.18 – Densificação Teste 2	109
Figura 5.19 – Densificação Teste 3	110
Figura 5.20 – Densificação Teste 4	111
Figura 5.21 – Densificação Teste 5	112
Figura 5.22 – Densificação Teste 6	113
Figura 5.23 – Densificação Teste 7	114
Figura 5.24 – Densificação Teste 8	115
Figura 5.25 – Superfície Teste 1	116
Figura 5.26 – Superfície Teste 2	117
Figura 5.27 – Superfície Teste 3	118
Figura 5.28 – Superfície Teste 4	120
Figura 5.29 – Superfície Teste 5	121
Figura 6.1 – PhotoScan: Número Médio de Pontos	125
Figura 6.2 – PhotoScan: Tempo de Execução do Alinhamento.....	126

Figura 6.3 – PhotoScan: Faces da Base do Modelo	127
Figura 6.4 – PhotoScan: Faces da Base do Modelo Reconstituída	129
Figura 6.5 – Número de Pontos da Fase de Correspondência da Peça A para os Diferentes Parâmetros de Sensibilidade e Rácio de Correspondência dos Pontos-Chave.....	133
Figura 6.6 – Tempo de Execução das Correspondências da Peça A para os Diferentes Parâmetros de Sensibilidade e Rácio de Correspondência dos Pontos-Chave.....	134
Figura 6.7 – Regard3D: Modelo com Faces Bastantes Rugosas	138
Figura 6.8 – Regard3D: Tempo de Execução da Triangulação	138
Figura 6.9 – Os Três Modelos Obtidos com Diferentes Valores de Trim Threshold (da esquerda para a direita: 1, 5 e 9 respectivamente)	146
Figura 6.10 – Regard3D: Modelo com Ruído	147
Figura 6.11 – Regard3D: Modelo Fragmentado	147
Figura 6.12 – Regard3D: Modelo com Ruído Aglomerado em Forma Cilíndrica	149
Figura 6.13 – PhotoScan: Parâmetros utilizados na Construção dos Modelos.....	150
Figura 6.14 – Peça B: a) Peça Real; b) Modelo Obtido pelo PhotoScan e Já Convertido em Sólido; c) Modelo de Cada Metade da Obtido pelo Regard3D).....	151
Figura 6.15 – Cotas da Peça B Selecionadas para a Análise da Exactidão	152
Figura 6.16 – Peça C: Peça Real e o Modelo Obtido pelo PhotoScan	153
Figura 6.17 – Cotas da Peça C Selecionadas para a Análise da Exactidão	154
Figura 6.18 – Peça C: Arestas Fragmentadas	155
Figura 6.19 – Peça D: A Peça Real, o Modelo Obtido pelo PhotoScan e o Modelo Obtido pelo Regard3D (esq-dir)	155
Figura 6.20 – Cotas da Peça D Selecionadas para a Análise da Exactidão.....	156

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Motivações que Levaram ao Emprego da Engenharia Inversa (adaptado de [3])	6
Tabela 2.2 - Usos Potenciais da Engenharia Inversa (adaptado de [3])	11
Tabela 4.1 – Regard3D: Parâmetros do Método de Densificação CMVS/PMVS.....	77
Tabela 5.1 - Designação das Peças Seleccionadas	82
Tabela 5.2 – PhotoScan Teste 1: Valores Medidos da Cota N.....	87
Tabela 5.3 - PhotoScan Teste 1: Valores do Factor de Escala	87
Tabela 5.4 – PhotoScan Teste 1: Volume e Área dos Modelos Após Aplicação do Factor de Escala	88
Tabela 5.5 – PhotoScan Teste 1: Medições das Cotas do Modelo 40 000/4000	88
Tabela 5.6 – PhotoScan Teste 1: Medições das Cotas do Modelo 100 000/4000	89
Tabela 5.7 – PhotoScan Teste 1: Medições das Cotas do Modelo Máximo/4000	89
Tabela 5.8 - PhotoScan Teste 2: Valores Medidos da Cota N	90
Tabela 5.9 - PhotoScan Teste 2: Valor do Factor de Escala.....	90
Tabela 5.10 – PhotoScan Teste 2: Volume e Área dos Modelos Após Aplicação do Factor de Escala	90
Tabela 5.11 – PhotoScan Teste 2: Medições das Cotas do Modelo 40 000/1000	91
Tabela 5.12 – PhotoScan Teste 3: Valores Medidos da Cota N.....	92
Tabela 5.13 – PhotoScan Teste 3: Valores do Factor de Escala	92
Tabela 5.14 – PhotoScan Teste 3: Volume e Área dos Modelos Após Aplicação do Factor de Escala	92
Tabela 5.15 – PhotoScan Teste 3: Medições das Cotas do Modelo Com Precisão Elevada.....	93
Tabela 5.16 – PhotoScan Teste 3: Medições das Cotas do Modelo Com Precisão Muito Elevada.....	93
Tabela 5.17 – PhotoScan Teste 4: Valores Medidos da Cota N.....	94
Tabela 5.18 – PhotoScan Teste 4: Valores do Factor de Escala	95
Tabela 5.19 – PhotoScan Teste 4: Volume e Área dos Modelos Após Aplicação do Factor de Escala	95
Tabela 5.20 – PhotoScan Teste 4: Medições das Cotas do Modelo Com Precisão de Densificação Baixa	95
Tabela 5.21 – PhotoScan Teste 4: Medições das Cotas do Modelo Com Precisão de Densificação Elevada	96
Tabela 5.22 - PhotoScan Teste 5: Valores Medidos da Cota N	97
Tabela 5.23 – PhotoScan Teste 5: Valor do Factor de Escala	97
Tabela 5.24 – PhotoScan Teste 5: Volume e Área dos Modelos Após Aplicação do Factor de Escala	97

Tabela 5.25 – PhotoScan Teste 5: Medições das Cotas do Modelo Com Precisão Densificação Mild	97
Tabela 5.26 – Peça A: Resultados das Correspondências pelo Regard3D.....	100
Tabela 5.27 – Correspondência Teste 1: Valores Medidos da Cota L	101
Tabela 5.28 – Correspondência Teste 1: Valores do Factor de Escala	101
Tabela 5.29 – Correspondência Teste 1: Medições das Cotas do Modelo 0.001/0.6	102
Tabela 5.30 – Correspondência Teste 1: Medições das Cotas do Modelo 0.001/0.7	102
Tabela 5.31 – Correspondência Teste 1: Medições das Cotas do Modelo 0.001/0.8	102
Tabela 5.32 – Correspondência Teste 1: Medições das Cotas do Modelo 0.001/0.9	103
Tabela 5.33 – Correspondência Teste 2: Valores Medidos da Cota L	103
Tabela 5.34 – Correspondência Teste 2: Valores do Factor de Escala	104
Tabela 5.35 – Correspondência Teste 2: Medições das Cotas do Modelo 0.0007/0.6	104
Tabela 5.36 – Correspondência Teste 2: Medições das Cotas do Modelo 0.0005/0.6	104
Tabela 5.37 – Correspondência Teste 2: Medições das Cotas do Modelo 0.0001/0.6	104
Tabela 5.38 – Triangulação Teste 1: Valores Medidos da Cota L	105
Tabela 5.39 – Triangulação Teste 1: Valores do Factor de Escala	105
Tabela 5.40 – Triangulação Teste 1: Medições das Cotas do Modelo Aperfeiçoamento Off ...	106
Tabela 5.41 – Triangulação Teste 2: Valores Medidos da Cota L	106
Tabela 5.42 – Triangulação Teste 2: Valores do Factor de Escala	106
Tabela 5.43 – Triangulação Teste 2: Medições das Cotas do Modelo Aperfeiçoamento On ...	107
Tabela 5.44 – Triangulação Teste 2: Medições das Cotas do Modelo Aperfeiçoamento Off ...	107
Tabela 5.45 – Densificação Teste 1: Valores Medidos da Cota L	108
Tabela 5.46 – Densificação Teste 1: Valores do Factor de Escala	109
Tabela 5.47 – Densificação Teste 1: Medições das Cotas do Modelo Visibilidade Off	109
Tabela 5.48 – Densificação Teste 2: Valores Medidos da Cota L	109
Tabela 5.49 – Densificação Teste 2: Valores do Factor de Escala	110
Tabela 5.50 – Densificação Teste 2: Medições das Cotas do Modelo MVE	110
Tabela 5.51 – Densificação Teste 3: Valores Medidos da Cota L	110
Tabela 5.52 – Densificação Teste 3: Valores do Factor de Escala	110
Tabela 5.53 – Densificação Teste 3: Medições das Cotas do Modelo Images per Cluster 500.	111
Tabela 5.54 – Densificação Teste 4: Valores Medidos da Cota L	111
Tabela 5.55 – Densificação Teste 4: Valores do Factor de Escala	111
Tabela 5.56 – Densificação Teste 4: Medições das Cotas do Modelo Tamanho de Célula 5....	112
Tabela 5.57 – Densificação Teste 5: Valores Medidos da Cota L	112

Tabela 5.58 – Densificação Teste 5: Valores do Factor de Escala	112
Tabela 5.59 – Densificação Teste 5: Medições das Cotas do Modelo Threshold 9.....	113
Tabela 5.60 – Densificação Teste 6: Valores Medidos da Cota L	113
Tabela 5.61 – Densificação Teste 6: Valores do Factor de Escala	113
Tabela 5.62 – Densificação Teste 6: Medições das Cotas do Modelo wsize 16.....	114
Tabela 5.63 – Densificação Teste 7: Valores Medidos da Cota L	114
Tabela 5.64 – Densificação Teste 7: Valores do Factor de Escala	114
Tabela 5.65 – Densificação Teste 7: Medições das Cotas do Modelo Número Mínimo de Imagens 3	115
Tabela 5.66 – Densificação Teste 8: Valores Medidos da Cota L	115
Tabela 5.67 – Densificação Teste 8: Valores do Factor de Escala	115
Tabela 5.68 – Densificação Teste 8: Medições das Cotas do Modelo Largura de Filtro 9	116
Tabela 5.69 – Superfície Teste 1: Valores Medidos da Cota L.....	117
Tabela 5.70 – Superfície Teste 1: Valores do Factor de Escala	117
Tabela 5.71 – Superfície Teste 1: Medições das Cotas do Modelo Samples per Node 13.....	117
Tabela 5.72 – Superfície Teste 2: Valores Medidos da Cota L.....	118
Tabela 5.73 – Superfície Teste 2: Valores do Factor de Escala	118
Tabela 5.74 – Superfície Teste 2: Medições das Cotas do Modelo Point Weight 8	118
Tabela 5.75 – Superfície Teste 3: Valores Medidos da Cota L.....	119
Tabela 5.76 – Superfície Teste 3: Valores do Factor de Escala	119
Tabela 5.77 – Superfície Teste 3: Medições das Cotas do Modelo Trim Threshold 1.....	119
Tabela 5.78 – Superfície Teste 3: Medições das Cotas do Modelo Trim Threshold 9.....	119
Tabela 5.79 – Superfície Teste 4: Valores Medidos da Cota L.....	120
Tabela 5.80 – Superfície Teste 4: Valores do Factor de Escala	120
Tabela 5.81 – Superfície Teste 4: Medições das Cotas do Modelo Confidence Threshold 10..	120
Tabela 5.82 – Superfície Teste 5: Valores Medidos da Cota L.....	121
Tabela 5.83 – Superfície Teste 5: Valores do Factor de Escala	121
Tabela 5.84 – Superfície Teste 5: Medições das Cotas do Modelo Minimum Component Size 4068	121
Tabela 6.1 – PhotoScan: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 1 e a Peça Real .	127
Tabela 6.2 – PhotoScan: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 2 e a Peça Real .	128
Tabela 6.3 – PhotoScan: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 3e a Peça Real ..	129
Tabela 6.4 – PhotoScan: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 4 e a Peça Real .	130
Tabela 6.5 – PhotoScan: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 5 e a Peça Real .	131

Tabela 6.6 – Regard3D Correspondências: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 1 e a Peça Real	135
Tabela 6.7 – Regard3D Correspondências: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 2 e a Peça Real	136
Tabela 6.8 – Regard3D Triangulação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 1 e a Peça Real	136
Tabela 6.9 – Regard3D Triangulação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 2 e a Peça Real	137
Tabela 6.10 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 1 e a Peça Real	139
Tabela 6.11 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 2 e a Peça Real	140
Tabela 6.12 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 3 e a Peça Real	140
Tabela 6.13 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 4 e a Peça Real	141
Tabela 6.14 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 5 e a Peça Real	142
Tabela 6.15 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 6 e a Peça Real	142
Tabela 6.16 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 7 e a Peça Real	143
Tabela 6.17 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 8 e a Peça Real	144
Tabela 6.18 – Regard3D Superfície: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 1 e a Peça Real	144
Tabela 6.19 – Regard3D Superfície: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 2 e a Peça Real	145
Tabela 6.20 – Regard3D Superfície: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 3 e a Peça Real	146
Tabela 6.21 – Regard3D Superfície: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 4 e a Peça Real	148
Tabela 6.22 – Regard3D Superfície: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 5 e a Peça Real	148
Tabela 6.23 – Regard3D: Parâmetros Utilizados na Construção dos Modelos	150
Tabela 6.24 – Peça B: Diferenças entre os Valores dos 2 Modelos e a Peça Real	153
Tabela 6.25 – Peça C: Diferenças entre os Valores do Modelo e a Peça Real	154
Tabela 6.26 – Peça D: Diferenças entre os Valores dos 2 Modelos e a Peça Real	156

Tabela 9.1 – Peça A: Resultados das Correspondências (40 000/1000)	165
Tabela 9.2 - Peça A: Resultados das Correspondências (100 000/1000)	165
Tabela 9.3 - Peça A: Resultados das Correspondências (Máximo/1000)	166
Tabela 9.4 - Peça A: Resultados das Correspondências (40 000/4000)	166
Tabela 9.5 - Resultados das Correspondências (100 000/4000)	166
Tabela 9.6 - Resultados das Correspondências (Máximo/4000)	167
Tabela 9.7 - Características do Equipamento Utilizado.....	167
Tabela 9.8 – Peça A: Tempos de Correspondências e Alinhamento	167

Simbologia

B_1, B_2, B_3, B_4	Feixes de luz usados na medição do deslocamento planar
$B_{[i,j]}$	Imagem binária
c	Velocidade da luz
D	Distância entre o scanner e o ponto da superfície
d_i	Distância da imagem
E	Matriz essencial
$E_{(x,y)}$	Radiância na imagem
F	Matriz fundamental
F_F	Frequência das franjas
F_T	Imagem cinzenta limiar
f	Distância focal
f_g	Frequência da grelha virtual
f_s	Frequência da grelha da superfície
I_f	Imagem focada
K	Matriz de calibração da câmara
k_1, k_2	Coeficiente da distorção radial
$L(r)$	Função de distorção
L	Distância fixa entre a fonte de luz e a câmara
N_x	Franja perpendicular ao eixo X
N_y	Franja perpendicular ao eixo Y
P	Matriz de projecção
R	Matriz correspondente à orientação da câmara
s	Distância do disco ao centro da câmara
T	Vector tridimensional associado à posição do ponto de origem
T_L	Valor limiar
t	Tempo total de viagem
V	Valor médio medido
\bar{V}	Valor verdadeiro
λ	Comprimento de onda

1. Introdução

1.1. Contexto e Motivação

Seja de forma intuitiva ou conscientemente, o processo de recolha de informação é uma necessidade humana. Em engenharia, por vezes surge o dilema da falta de documentação acerca de parte de um mecanismo ou o seu todo, tornando impossível a compreensão dos dados em falta. A engenharia inversa surge como a solução mais forte e adequada, realizando o processo em sentido inverso, partindo do componente final até à fase de projecto inicial.

Apesar de este processo ser aplicado desde há muito tempo, nas últimas décadas têm surgido vários métodos que facilitam e integram a engenharia inversa em diversas áreas de estudo. Em especial na reconstrução tridimensional de peças reais acabadas, onde os métodos foram evoluindo com a ajuda das novas tecnologias, acabando por se tornar uma alternativa concreta aos ditos métodos convencionais.

Como na engenharia a procura pela melhor solução é imperativa, a engenharia inversa pode acrescentar novas ideias e metodologias à concepção do projecto mecânico, em particular, na área da engenharia mecânica.

1.2. Objectivos

O estudo presente neste trabalho pretende averiguar se, com recurso apenas a um simples equipamento fotográfico, é possível aplicar um processo de engenharia inversa a peças finais, de forma a obter-se modelos tridimensionais realistas que possam ser alvo de estudo. Recorrendo a dois programas, o *Agisoft PhotoScan* e o *Regard3D*, na versão de teste e licença gratuita respectivamente, são analisadas quatro peças com diferentes geometrias.

Visto que estes programas computacionais não foram construídos com o intuito de servirem como uma ferramenta de engenharia mecânica, é necessário testar os diferentes parâmetros de funcionamento, em busca de uma configuração que permita entender as implicações que se produzem no modelo final. Existem outros métodos utilizados com este propósito de conversão de uma peça num modelo CAD, como mencionados no capítulo seguinte, no entanto é necessário um investimento considerável em equipamento técnico. Pelo método *Structure from Motion* no qual se baseiam os programas referidos, é de extrema importância conhecer as limitações e desafios que possam surgir ao longo das várias fases do processo de obtenção do modelo tridimensional, para que o mesmo seja o mais eficiente possível.

1.3. Estrutura da Dissertação

A divisão deste trabalho está organizada em sete capítulos principais:

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo actual onde é feita uma pequena introdução ao trabalho e o seu intuito.

Capítulo 2 – Engenharia Inversa

Definição do conceito de Engenharia Inversa, registos da sua aplicação ao longo da história da Humanidade e as suas aplicações. Conceitos e definições dos termos mais recorrentes, como nuvem de pontos, malha e ruído. Apresentação das várias fases da engenharia inversa: a aquisição de dados, onde é feita a introdução e explicação dos métodos – com e sem contacto – disponíveis actualmente para a recolha de informação; o pré-processamento; e a segmentação.

Capítulo 3 – Structure from Motion

Explicação de todas as etapas do método *Structure from Motion*, onde é feita a descrição dos processos realizados em cada etapa, apoiado na teoria matemática em que se baseiam.

Capítulo 4 – Programas Computacionais de Reconstrução de Modelos 3D Utilizados

Apresentação dos programas computacionais *Agisoft PhotoScan* e *Regard3D*, com o procedimento de utilização para a obtenção dos modelos 3D do estudo.

Capítulo 5 – Trabalho Experimental

Metodologia adoptada para a recolha dos dados, testes de modelos com diferentes valores de parâmetros funcionais e registo das medições efectuadas em cada modelo.

Capítulo 6 – Análise de Resultados

Análise aos resultados dos testes anteriores, com a comparação dos dados obtidos com os valores das cotas medidas com o paquímetro.

Capítulo 7 - Conclusões

Conclusões finais acerca da viabilidade do método *Structure from Motion* na modelação de componentes mecânicos e considerações relevantes, e possíveis trabalhos futuros.

2. Engenharia Inversa

2.1. Introdução

O desenvolvimento de um produto tem por base várias etapas, que vão desde a sua idealização até à forma física final. Normalmente, é esta última etapa que encerra o ciclo de desenvolvimento antes da comercialização, mas a qual serve de início ao processo de extrair informação de produtos finais, i.e., engenharia inversa [1].

Varady, Martin e Cox [2] distinguiram a engenharia convencional da inversa, como sendo a convencional a engenharia que transforma conceitos e modelos de engenharia em peças reais, enquanto a engenharia inversa transforma peças reais em modelos e conceitos de engenharia. De forma mais abrangente, a engenharia inversa é o processo de descoberta dos princípios fundamentais que sustentam e habilitam um objecto, aparelho, produto, substância, montagem ou sistema, através de uma análise sistemática da sua estrutura, função ou operação [3].

De um ponto de vista mais simples, a engenharia inversa está presente em processos comuns, e.g., o processo de desmontar um equipamento para perceber o seu funcionamento. A aplicação da engenharia inversa permite obter informação que se encontra desconhecida, podendo a mesma ser de grande relevância.

A engenharia inversa possui várias aplicações motivadas por diferentes razões, e nem sempre as mais éticas. No entanto a sua aplicação pode trazer grandes vantagens. As principais necessidades que motivam a sua empregabilidade foram identificadas por Messler na sua obra [3], e encontram-se descritas abaixo:

- Propósitos académicos ou de aprendizagem, tendo como objectivo compreender os problemas de um projecto deficiente e solucioná-los;
- Resolução de falhas de documentação, proporcionando que um sistema seja completamente documentado nas fases de projecto, produção, operação, manutenção ou reparação;
- Análise de segurança do produto, examinando o seu funcionamento para determinar as suas especificações, estimar os seus custos e averiguar a existência de uma potencial violação de patente, e nesse caso, como contornar as restrições de acesso;
- Inteligência técnica competitiva, comparando os produtos de competidores rivais com aqueles produzidos;
- Espionagem comercial ou militar, com vista ao conhecimento e descoberta de investigações ou inovações de um competidor ou inimigo, capturando ou roubando um protótipo e desmantelá-lo para desenvolver um produto similar.

Na Tabela 2.1 estão presentes exemplos das motivações acima referidas que levaram ao uso da engenharia inversa.

Tabela 2.1 - Motivações que Levaram ao Emprego da Engenharia Inversa (adaptado de [3])

<i>Propósitos Académicos ou de Aprendizagem</i>	Compreensão do mecanismo de Anticitera
<i>Falhas de Documentação</i>	Substituição de peças gastas ou partidas em navios quando o construtor original já não se encontra no mercado
<i>Análise de Segurança do Produto</i>	Clones de computadores IBM
<i>Inteligência Técnica Competitiva</i>	Fabricantes de <i>smartphones</i> observando os concorrentes
<i>Espionagem Comercial</i>	Tentativa de copiar a fórmula da Coca-Cola
<i>Espionagem Militar</i>	Cópia do <i>Rocket V2</i> alemão por parte dos E.U.A. e U.R.S.S.

2.2. Engenharia Inversa ao Longo dos Tempos

A engenharia inversa é aplicada há já vários séculos, apesar de a sua denominação só ter começado a ser usada mais recentemente. Mas a história está repleta de vários exemplos de como a engenharia inversa foi utilizada como uma ferramenta vital para o progresso e desenvolvimento em várias áreas.

Durante a construção da Grande Pirâmide de Khufu (Figura 2.1), também conhecida como Pirâmide de Giza, finalizada por volta de 2560 A.C., o arquitecto Hemiunu deparou-se com fendas de enorme dimensão presentes nas vigas que poderiam levar ao colapso da câmara principal ainda antes da conclusão da construção da pirâmide. Hemiunu decidiu analisar todas as etapas de construção da pirâmide executadas até aquele momento e identificar as decisões tomadas que tinham obtido sucesso e as que não. A partir dessa informação foi adaptando o projecto à medida que a pirâmide era erguida, evitando repetir os mesmos erros para evitar futuras falhas de construção [4].



Figura 2.1 - Grande Pirâmide de Khufu (fotografia de Pichugin Dmitry)

Isto é, ao longo da construção da pirâmide, Hemiuni foi melhorando os conhecimentos de engenharia estrutural a partir da estrutura. Pelo conhecimento obtido pelo processo de engenharia inversa aplicado à construção, o arquitecto solucionou as fendas das vigas desviando o peso sobre as mesmas, que suportavam o tecto da câmara, para os suportes de cada lado da câmara. Por cima das vigas foram criados cinco *compartimentos de alívio* (Figura 2.2), colocados uns em cima dos outros, de forma a que a carga sobre a câmara não provocasse o colapso.



Figura 2.2 – Compartimentos de Alívio da Pirâmide (imagem retirada a partir da 3D Experience da Dassault Systemes)

Um outro exemplo das vantagens da engenharia inversa pode ser encontrado durante a época do Império Romano. O historiador grego Polybius (200 A.C. – 118 A.C.) relata na sua obra *The Histories* [5] que os Romanos capturaram um navio birreme fenício, e aplicando o método de peças padronizadas usadas pelos cartagineses na construção dos seus navios, conseguiram produzir cem réplicas de uma versão melhorada do navio fenício original, com os quais tomaram o controlo do mar Mediterrâneo no espaço de sessenta dias.

O chamado *fogo Grego* foi uma arma incendiária desenvolvida e usada pelo Império Bizantino, que possibilitava o fogo continuar activo mesmo flutuando na água, e que tentou ser copiado por diferentes povos devido à sua utilidade nas batalhas navais. Como a sua fórmula era segredo, os outros povos tentaram recriar o fogo através de engenharia inversa, dando azo a diferentes variações [3].



Figura 2.3 – Basílica de São Pedro (fotografia de italia.it)

Outro exemplo será o da cúpula da Basílica de São Pedro, construída por Miguel Ângelo que observou anteriormente noutras cúpulas, de menor dimensão, a existência de problemas usando secções de espessura constantes. De modo a diminuir o peso, projectou a cúpula com zonas de espessura variável consoante a necessidade. Foi a partir da informação da construção de cúpulas anteriores, no seu estado final, que foi possível adquirir conhecimentos para construir outras de maior tamanho.

O período da Revolução Industrial testemunhou o aparecimento do motor a vapor. A primeira versão, da autoria de Thomas Newcomen em 1712, foi seguida de outros motores, mais robustos, por via da engenharia inversa, que foram melhorando o motor original de Newcomen, e tornando a engenharia inversa como uma ferramenta importantíssima no avanço da tecnologia [6].

No ano de 1945, aquando da Segunda Guerra Mundial, aviões de combate da força aérea americana, que participavam na guerra com o Japão, foram forçados a aterrar de emergência em território Este da União Soviética. As suas tripulações foram autorizadas a regressar aos Estados Unidos da América, mas os aviões foram retidos e mantidos em solo soviético. Após serem realizados testes nos aviões americanos, o então líder soviético Joseph Stalin ordenou a criação de um programa de duplicação das aeronaves americanas, que levaram à dissecação das mesmas, e à cópia das cento e cinco mil peças que constituíam o veículo (Figura 2.4) [3].



(a)



(b)

*Figura 2.4 – (a) Avião Americano B-29 Superfortress (fotografia de aviation-history.com);
(b) Avião Soviético Tupolev TU-4 (fotografia de Alan Wilson)*

2.3. Usos Potenciais da Engenharia Inversa

Em termos de aplicação em diferentes fases do desenvolvimento do produto, a engenharia inversa é uma técnica que apresenta potenciais benefícios. Através daquilo que foi conseguido anteriormente é possível procurar melhorias, encontrar soluções ou até novos propósitos para um produto final. A Tabela 2.2 apresenta como pode ser utilizada a engenharia inversa nas várias etapas.

Tabela 2.2 - Usos Potenciais da Engenharia Inversa (adaptado de [3])

<i>Necessidades ou oportunidades orientadas para marketing:</i> <ul style="list-style-type: none">• <i>Benchmarking</i>• Redução de custos sem redução de funcionalidades e/ou desempenho• Melhorar funcionalidades e/ou desempenho sem aumento de custos• Melhorar um projecto defeituoso• Descobrir uma oportunidade para um novo projecto ou produto
<i>Necessidades ou oportunidades orientadas para projecto:</i> <ul style="list-style-type: none">• Descobrir características não coordenadas de um projecto ou produto• Recriar ferramentas em faltas necessárias para a produção
<i>Necessidades ou oportunidades orientadas para fabrico:</i> <ul style="list-style-type: none">• Reduzir custos directos com materiais e processos como parte da engenharia de valor• Melhorar a eficiência através de processos de sistematização (identificando propriamente as sequencias das operações necessárias) e a produtividade (fazendo peças e a sua montagem mais fácil)• Reduzindo <i>time-to-market</i>
<i>Necessidades ou oportunidades orientadas para qualidade:</i> <ul style="list-style-type: none">• Solucionar defeitos ou deficiências num projecto, processo ou produto• Maximizar a capacidade de produção através de uma melhor documentação de um projecto ou produto
<i>Usos abrangentes:</i> <ul style="list-style-type: none">• Descobrir novas tecnologias ou princípios tecnológicos que permitam inovar projectos ou produtos• Descobrir novos conceitos de geometria de peças ou estruturas, arranjo de peças numa montagem ou elementos numa estrutura, materiais de construção e métodos de fabrico

2.4. Conceitos e Definições da Engenharia Inversa Geométrica

Os conceitos e definições mais relevantes da engenharia inversa são apresentados, de forma resumida, neste subcapítulo. Para uma compreensão do processo integral é necessário identificar os seguintes termos:

Nuvem de Pontos

A nuvem de pontos (Figura 2.5) é o conjunto de pontos medidos pertencentes à superfície do objecto. Os pontos possuem coordenadas no espaço tridimensional, XYZ, e são o resultado de várias medições de diferentes pontos de vista. A densidade da nuvem dependerá da dispersão dos pontos ao longo do espaço, e as regiões vazias entre os aglomerados de pontos indicam locais onde não foi possível fazer medições de pontos.

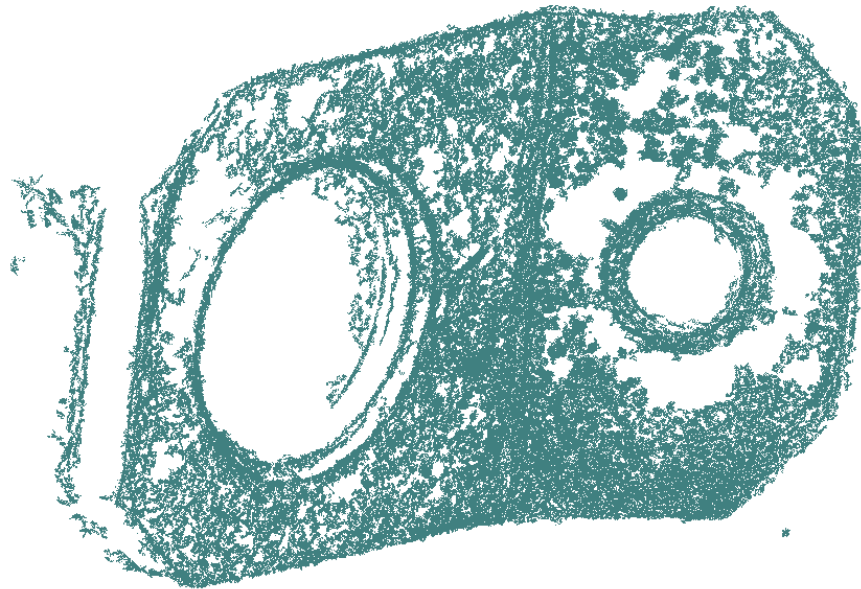


Figura 2.5 - Nuvem de Pontos

Malha

A malha, também referida como malha poligonal (Figura 2.6), é um conjunto de faces, constituídas por vértices e arestas, que definem a forma de uma superfície em três dimensões. A sua obtenção parte da nuvem de pontos, onde os pontos agrupam-se para formar faces normalmente constituídas por triângulos, quadriláteros ou outros polígonos convexos, simplificando o processo de renderização da superfície. Em algumas situações as faces podem ser também constituídas por polígonos côncavos ou por outras formas geométricas mais complexas.

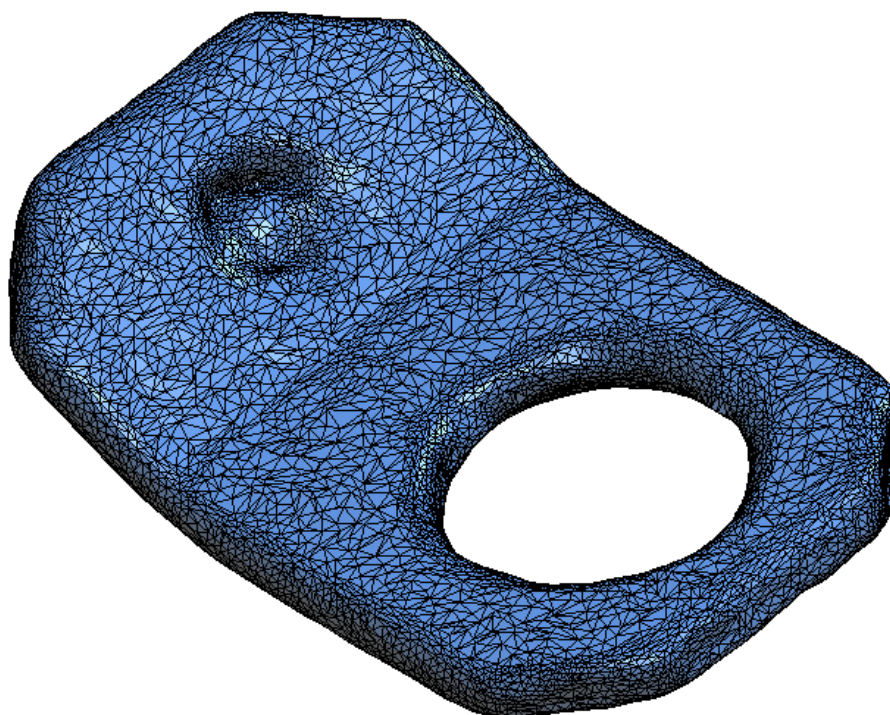


Figura 2.6 - Malha Poligonal

Ruído

O ruído presente numa nuvem de pontos ou malha (Figura 2.7) é toda a informação que não contém qualquer valor para a qualidade da representação do objecto ou mesmo não fazendo parte do mesmo. Vernon [7] define mesmo o ruído como “qualquer contaminação indesejada de uma imagem”. No entanto, aquando da remoção do ruído é necessário algum cuidado pois uma remoção muito severa poderá levar à falta de informação em alguns locais, o que poderá implicar um modelo com falta de informação. Muitas vezes os comandos de remoção de ruído realizam a operação pela distância de pontos (no caso de uma nuvem) ou faces (no caso de uma malha) aos pontos e faces mais próximos, respectivamente. Assim, se for definido, automaticamente pelo comando ou não, que qualquer ponto ou face dentro de um determinado raio se encontre isolado, então os mesmos serão eliminados. Normalmente é necessário executar manualmente a remoção do ruído para reduzi-lo na sua quase totalidade, processo que poderá ser moroso dependendo da qualidade da nuvem ou malha.

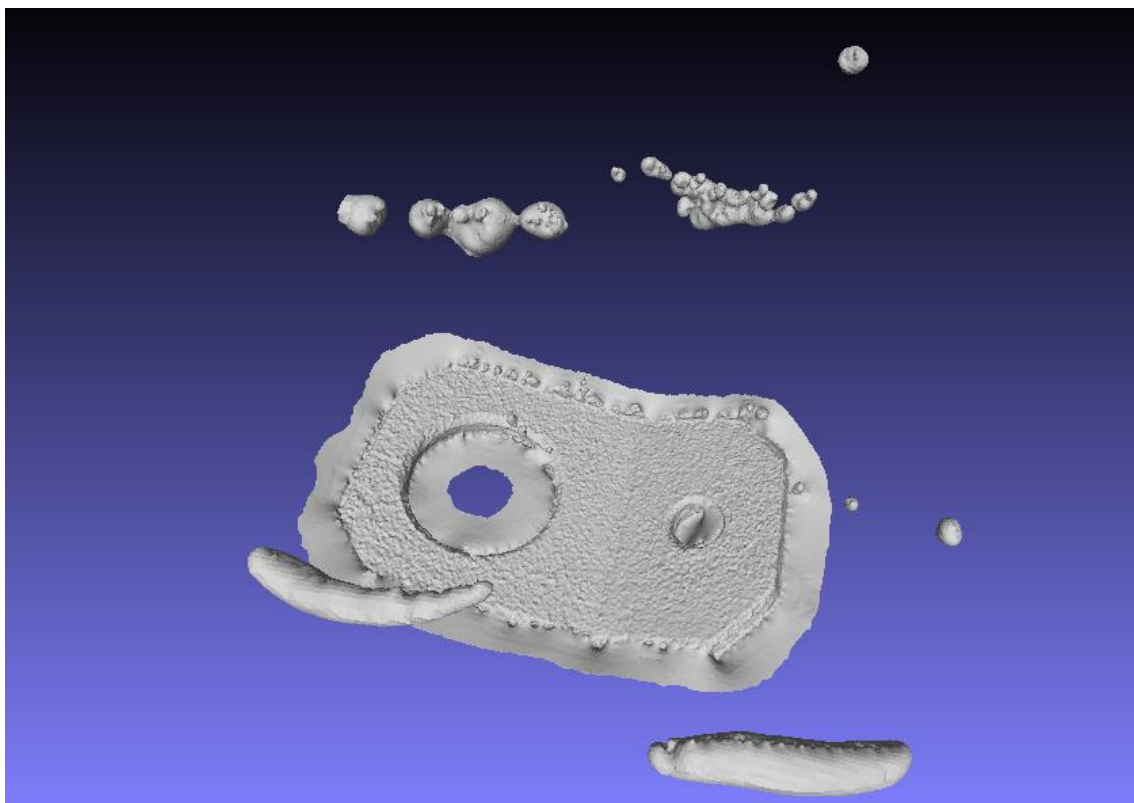


Figura 2.7 - Malha antes do Processo de Remoção de Ruído

Resolução

Uma das propriedades das malhas é a sua resolução, e que define o nível de detalhes visíveis na superfície de interesse. A resolução está extremamente relacionada com o número de vértices, arestas e faces da malha, sendo que quanto maior a resolução maior será a quantidade destes. A resolução de uma malha pode ser alterada usando comandos de simplificação de malha ou diminuição do número de faces da malha. Aplicando um comando de simplificação, o objectivo será reduzir o número de faces que descrevem o objecto, ao mesmo tempo que é preservada a sua forma, distribuindo os vértices de forma uniforme ao longo da malha [8].

A Figura 2.8 representa uma superfície com três resoluções diferentes. A partir da malha de maior resolução foram aplicados vários comandos de simplificação de forma a reduzir a quantidade de vértices e faces. De cima para baixo, as malhas apresentam respectivamente: 179 567 vértices e 357 304 faces; 44 841 vértices e 89 325 faces; 11 253 vértices e 22 331 faces. De notar que quanto menor a resolução de uma nuvem ou malha, mais reduzido será o tamanho do ficheiro.

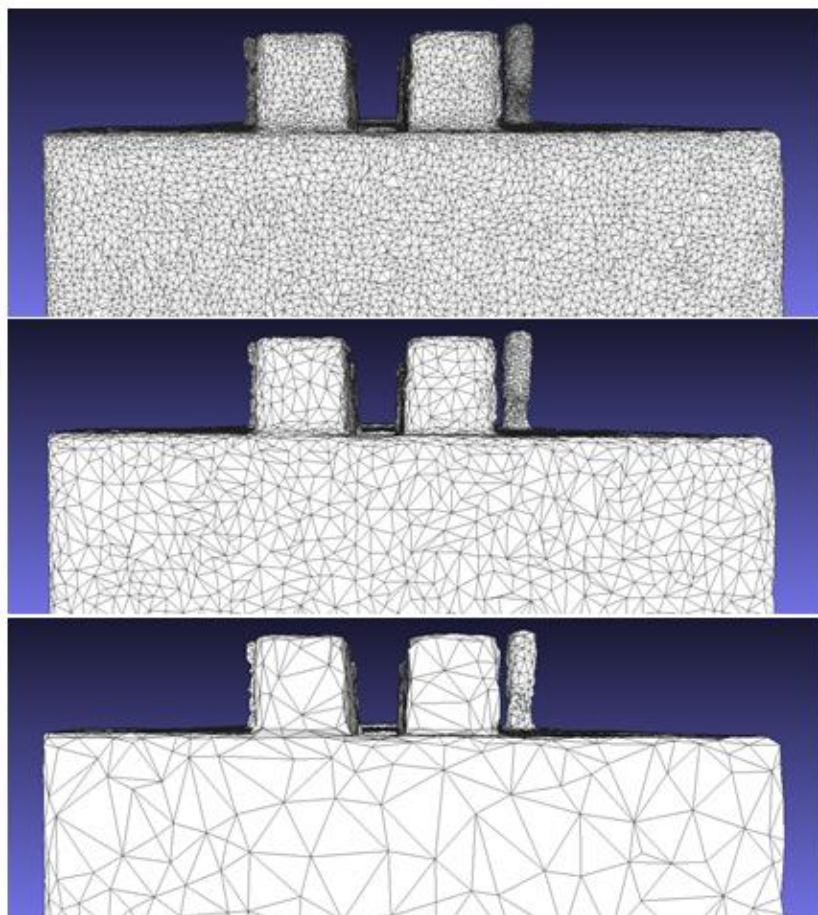


Figura 2.8 – A Mesma Superfície com Três Resoluções Diferentes

Precisão e Exactidão

Uma nuvem de pontos ou uma malha pode apresentar uma elevada resolução (precisão), mas no entanto não representar o modelo correctamente (exactidão). Tal deve-se à precisão e à exactidão. Idealmente, o objectivo do modelo geométrico a três dimensões será ser a representação mais próxima da realidade, mas para isso é necessário que a precisão e a exactidão sejam ambas adequadas.



Figura 2.9 - Precisão e Exactidão

2.5. Fases da Engenharia Inversa Geométrica

O processo da engenharia inversa geométrica é constituído por quatro fases gerais (Figura 2.10). Estas fases ocorrem de forma sequencial, e partem da análise da geometria de um objecto físico até à obtenção de um modelo tridimensional do mesmo.

A primeira fase é reconhecida com a *Aquisição de Dados*, onde os dados obtidos são pontos do objecto alvo. Existem diferentes métodos usados para localizar estes pontos, e a escolha do método a usar é influenciada pela natureza do objecto e pelo espaço envolvente.

Segue-se a fase de *Pré-processamento* onde os dados adquiridos na etapa anterior são tratados, através de mecanismos que permitem identificar e seccionar os pontos relevantes e excluir o ruído.

A fase seguinte, *Segmentação e Montagem de Superfícies*, onde as diferentes superfícies são classificadas e posteriormente rearranjadas numa montagem com o objectivo de obter uma superfície optimizada. Por último, é criado um modelo a três dimensões do modelo usado nos sistemas CAD, fase denominada de *Criação de Modelo 3D*.

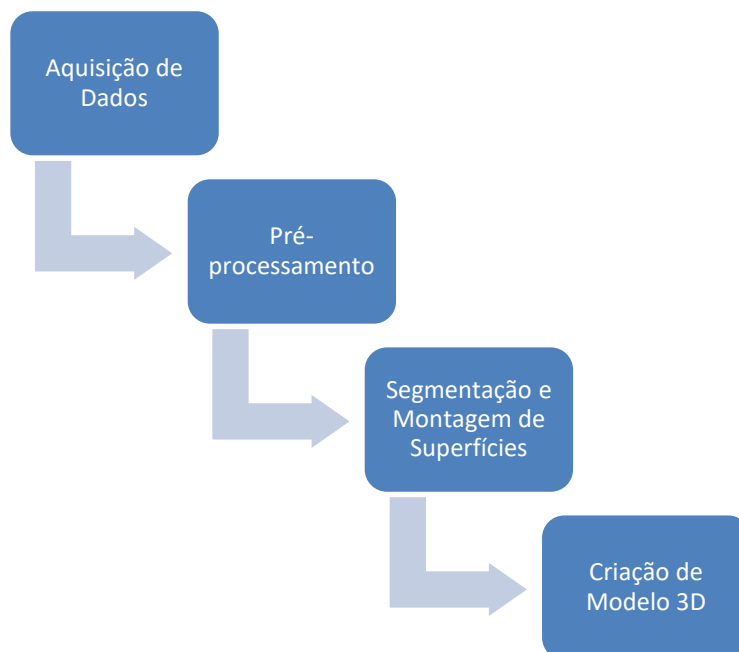


Figura 2.10 – Fases do Processo da Engenharia Inversa Geométrica [2]

Mais recentemente [9], o processo de engenharia inversa geométrica para modelos CAD foi dividido de forma mais detalhada. As várias etapas de cada fase encontram-se definidas por diferentes cores na Figura 2.11.

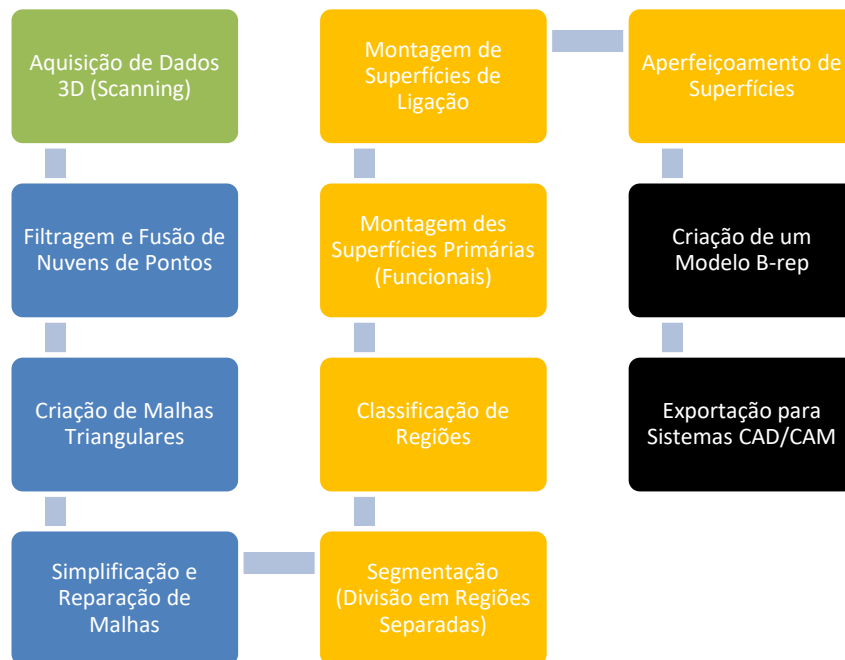


Figura 2.11 - Etapas da Engenharia Inversa Geométrica (Verde – Aquisição de Dados; Azul – Pré-processamento; Amarelo – Segmentação e Montagem de Superfícies; Preto – Criação de Modelo 3D)

2.5.1. Aquisição de Dados

O primeiro passo é onde são obtidos os dados necessários para a construção do modelo tridimensional. É imperativo que o método utilizado na recolha das formas geométricas seja aquele que se adeque ao objecto físico alvo, para que a informação recolhida seja o mais fiel possível à realidade, influenciando a qualidade do modelo final.

Os métodos de aquisição (Figura 2.12) dividem-se em três tipos: os métodos que não exigem contacto físico com o objecto, e que podem ser acústicos, magnéticos ou ópticos; os métodos que obrigam a que ocorra contacto com o objecto, como braços mecânicos, sistemas CMM ou sistemas CNC; e os métodos destrutivos [2] [10].

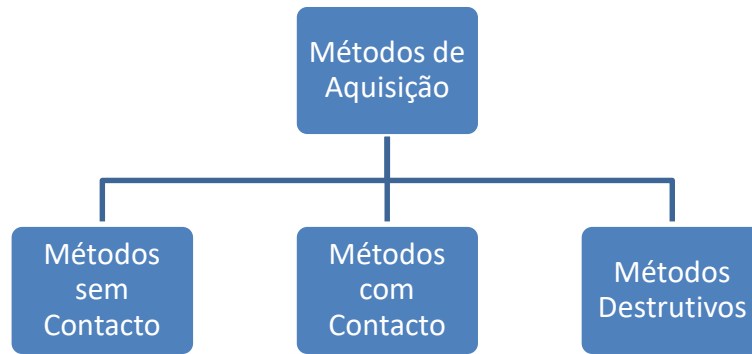


Figura 2.12 – Métodos de Aquisição de Dados

2.5.1.1. Métodos Sem Contacto

Classificam-se por *Métodos Sem Contacto* todos os métodos de aquisição de dados que não exigem qualquer contacto físico entre o sistema que realiza a aquisição com o objecto alvo. A interacção entre os mesmos é feita através de um fenómeno físico, sendo usado som, campos magnéticos ou luminosidade. Tendo em conta o tipo de fenómeno físico utilizado para a obtenção de dados, chamam-se, respectivamente, métodos acústicos, magnéticos ou ópticos (Figura 2.13).

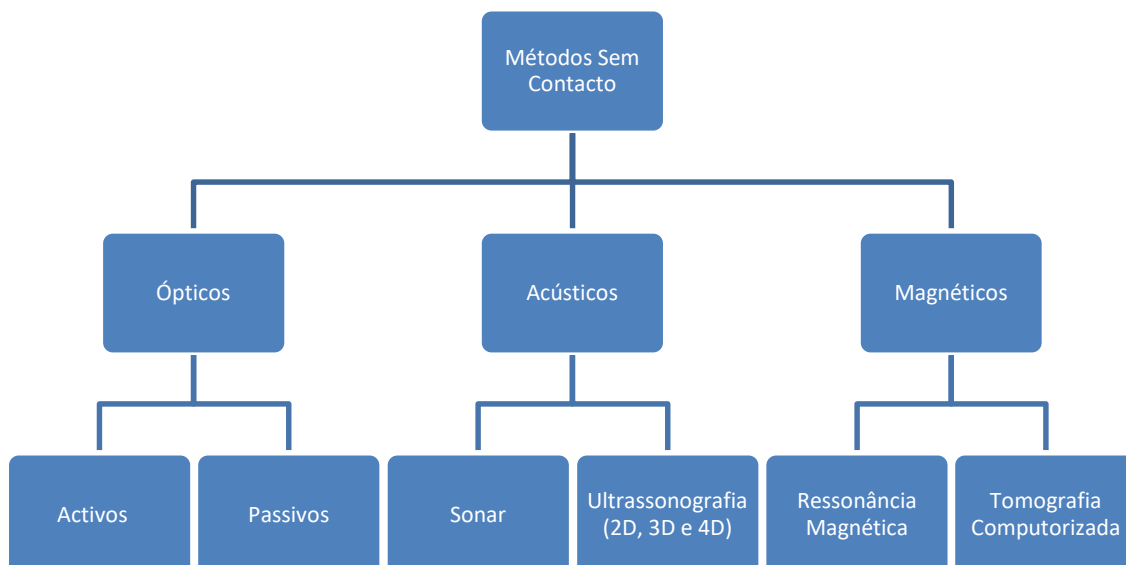


Figura 2.13 - Métodos de Aquisição de Dados Sem Contacto

2.5.1.1.1. Métodos Ópticos

Os métodos ópticos distinguem-se em dois tipos (Figura 2.14). Aqueles que recorrem ao uso de luz natural para realizar a detecção de dados, intitulados de *Métodos Ópticos Passivos*, e aqueles que utilizam de alguma forma luz artificial para a aquisição de dados são identificados como *Métodos Ópticos Activos*.

Os *Métodos Activos* são constituídos por quatro categorias principais: *Iluminação Estruturada*, *Interferometria de Moiré*, *Tempo de Voo* e *Triangulação*. Já os *Métodos Passivos* baseiam a captura de dados através da análise de imagens. Os *Métodos de Análise de Imagem* são denominados *Structure* (estrutura) ou *Shape* (forma) em que é necessário capturar e analisar as diferentes imagens de forma a ser possível recriar uma superfície [2].

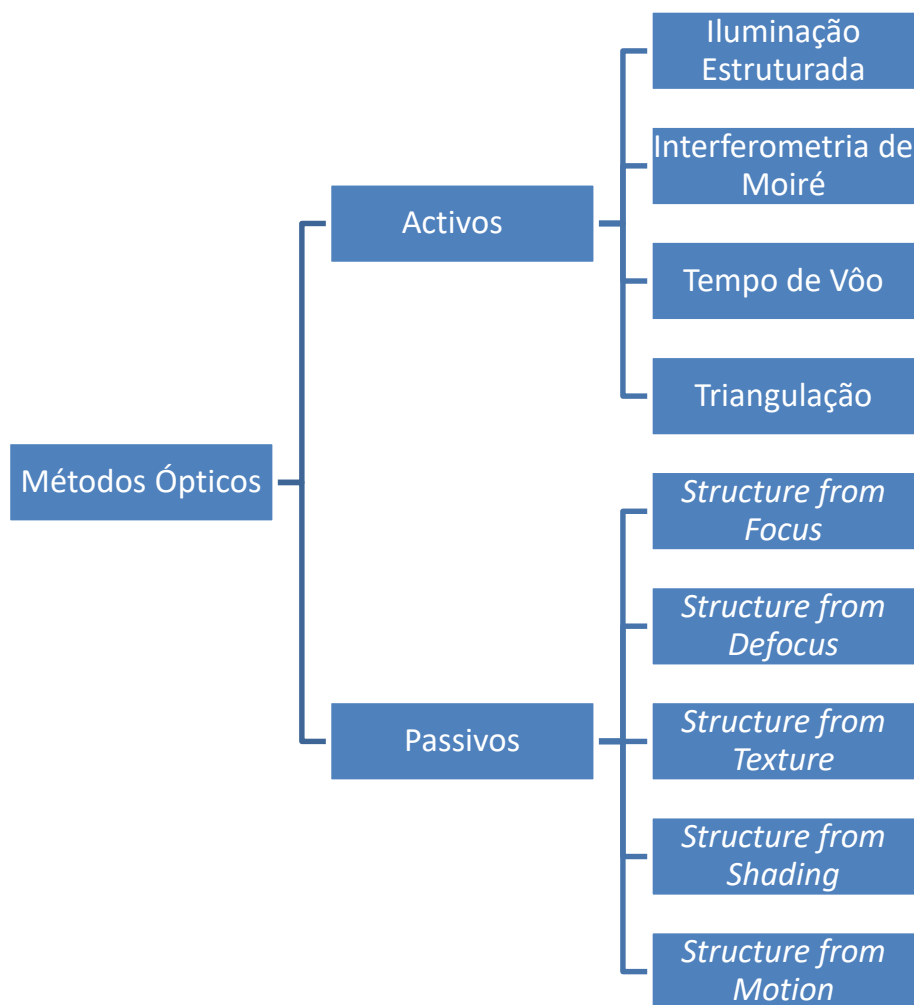


Figura 2.14 - Métodos Ópticos de Aquisição de Dados

2.5.1.1.1. Iluminação Estruturada

Um dos métodos ópticos activos é a *Iluminação Estruturada*, em que são projectados padrões de luz sobre a superfície do objecto, e obtida uma imagem resultante do padrão geometricamente distorcido que é reflectido pela superfície (Figura 2.15). A partir dessa imagem é possível determinar as coordenadas da superfície [11]. Os sistemas que utilizam *Iluminação Estruturada* permitem recolher milhões de pontos por segundo e conseguem recolher informação acerca das cores da textura das superfícies.

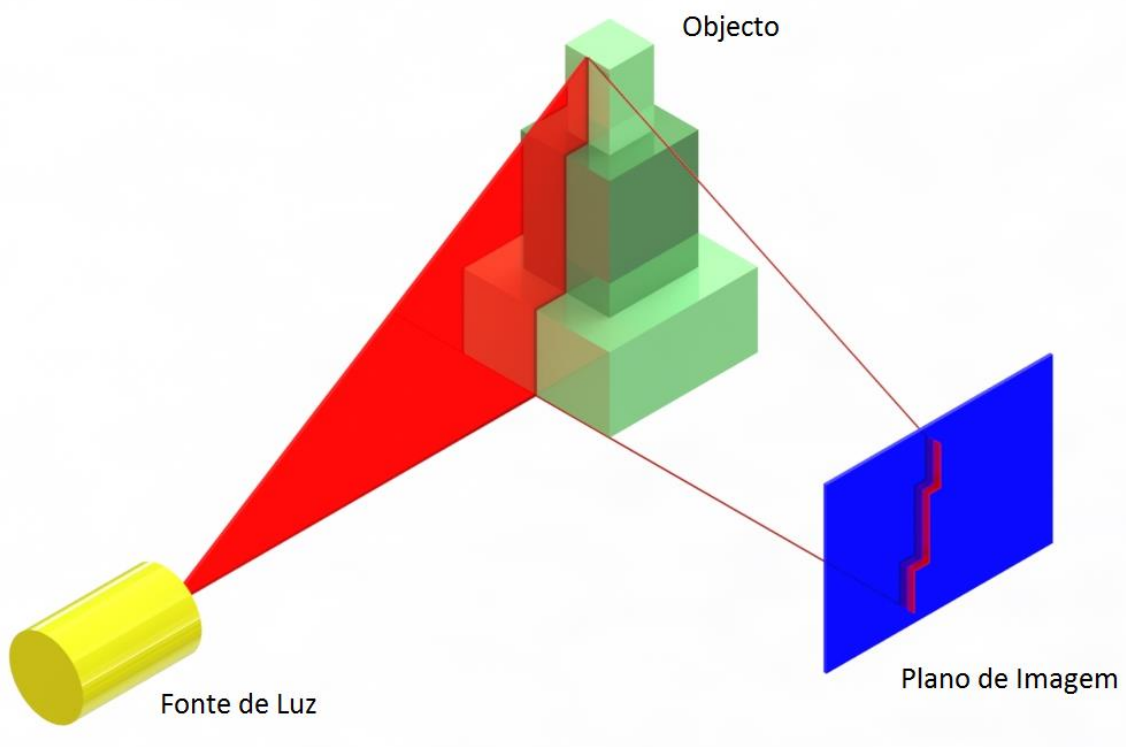


Figura 2.15 - Método da Iluminação Estruturada

As coordenadas dos pontos superficiais são calculadas de forma computadorizada pela intersecção da linha de visão capturada no plano de imagem com o plano da luz projectada [7]. O padrão de luz percorre a superfície do objecto numa direcção, p.e., ao longo do eixo de coordenadas das cotas z do sistema, e ao mesmo tempo, são recolhidas uma sequência de imagens em intervalos descontínuos, sendo atribuído a cada imagem um valor i correspondente à posição z em que foi tirada.

Em cada imagem capturada são obtidas as coordenadas (x_i, y_i) dos pixéis do padrão reflectido, e usando uma matriz de calibração, as coordenadas (x_i, y_i, z_i) transformadas para as coordenadas reais (x, y, z) .

Os padrões de luz projectados podem ser de diferentes tipos (Figura 2.16): o de *Ponto Único*, que devido a tornar esta abordagem lenta e não adequada para cenários dinâmicos é raramente aplicada [12]; o de *Linha de Luz*, o mais usado; o de *Tira Codificada*; o de *Padrão em Grelha*, também muito empregado em vários sistemas.

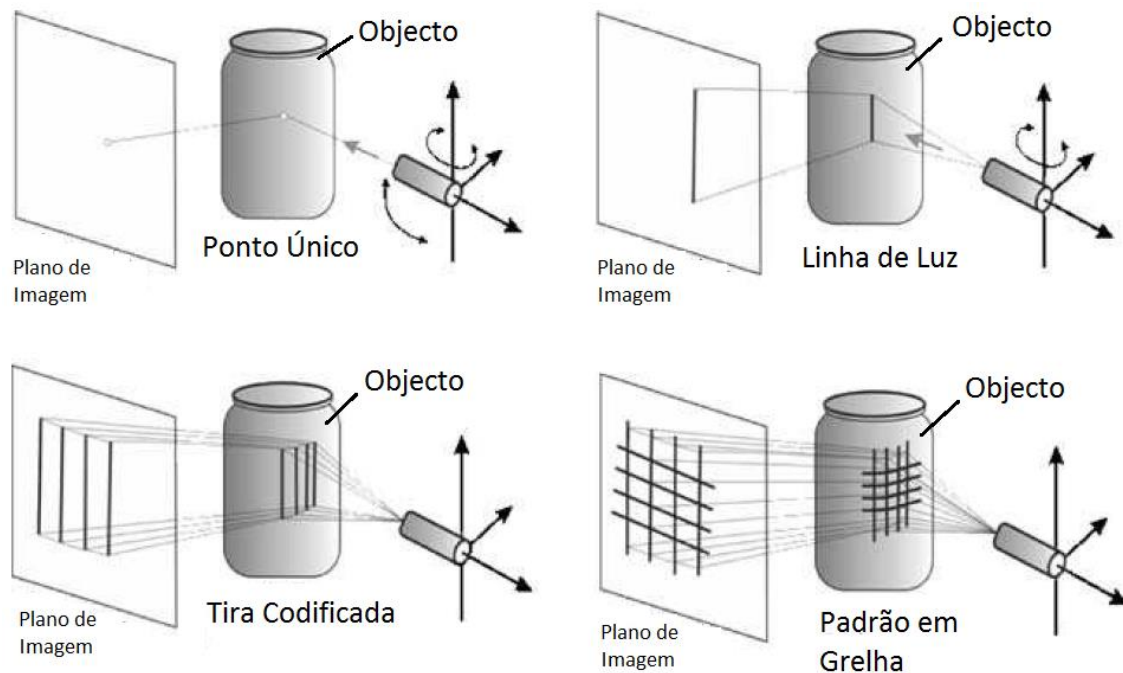


Figura 2.16 - Diferentes Padrões de Luz dos Sistemas de Iluminação Estruturada (adaptado de [10])

2.5.1.1.1.2. Triangulação

A *Triangulação* é um método activo que calcula as coordenadas de uma superfície a partir da localização das fontes de luz e dos dispositivos fotossensíveis, e dos ângulos formados entre os mesmos. A *Triangulação* geométrica é utilizada na maioria dos scanners por laser, que possuem duas variantes: a primeira com uma fonte de luz e uma câmara (Figura 2.17), e a segunda variante com uma fonte de luz e duas câmaras (Figura 2.18), sendo que nesta situação a fonte de luz não está envolvido em nenhuma função de medição.

O seu princípio consiste no uso de uma fonte de luz de alta energia, sendo a mais comum o uso de lasers, focada e projectada em forma de ponto ou linha e num ângulo conhecido, deflectida através de um espelho rotacional, na superfície do objecto. O reflexo do ponto iluminado na superfície é focado por uma lente e capturado por um dispositivo fotossensível, normalmente uma câmara (CCD).

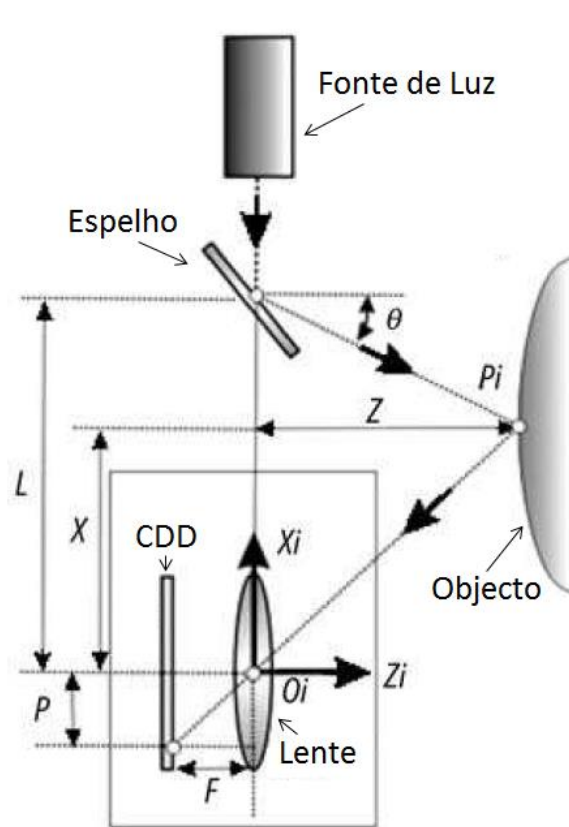


Figura 2.17 - Método da Triangulação com uma Câmara (adaptado de [10])

A distância entre a fonte de luz e a câmara é obtida através de calibração, o que permite calcular a posição do ponto iluminado P_i no sistema de coordenadas da câmara. Sendo conhecido as dimensões da distância focal da câmara F , da imagem de coordenadas do ponto iluminado P , da distância fixa entre a fonte de luz e a câmara L e do ângulo θ .

O erro de medição da coordenada Z é directamente proporcional a Z^2 , mas inversamente proporcional às distâncias L e F , pelo que incrementando a distância entre a fonte de luz e a câmara permite obter medições mais exactas [10]. No entanto, esta distância está limitada pela estrutura dos scanners, o que torna os scanners que usam triangulação indicados para objectos de dimensões reduzidas e a curtas distâncias.

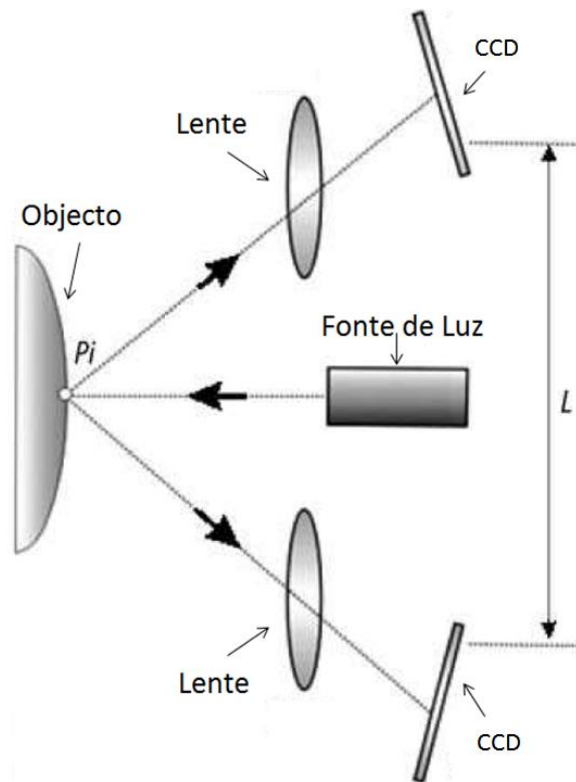


Figura 2.18 - Método de Triangulação com Dupla Câmara (adaptado de [10])

Dispositivo de Carga Acoplada (CDD)

Um dispositivo de carga acoplada, também conhecido como CDD (*charge coupled device*), é um sensor semicondutor constituído por uma matriz contida num circuito integrado. A matriz é constituída por condensadores acoplados, controlados por um circuito externo, que transferem a sua carga eléctrica para o condensador vizinho.

Os fótons da luz reflectida pela superfície do objecto implicam que os condensadores acumulem carga. Posteriormente a carga de cada condensador é transferida ao condensador vizinho, até ao último condensador que envia a sua carga a um amplificador para que seja convertida em tensão. O procedimento sucede-se até que toda a carga presente nos condensadores seja convertida numa sequência de tensões.

Os scanners, em regra geral, utilizam uma arquitectura *interline transfer* (Figura 2.19) em que os elementos do sensor sensíveis à luz, fotodíodos, estão dispostos em colunas, em que cada coluna se encontra ligada a um registador de deslocamento (*shift register*), através de um portão de transferência (*transfer gate*). A carga oriunda dos fotodíodos desloca-se para os registadores de deslocamento verticais de linha em linha até ao registador de leitura horizontal (*horizontal readout register*) [13].

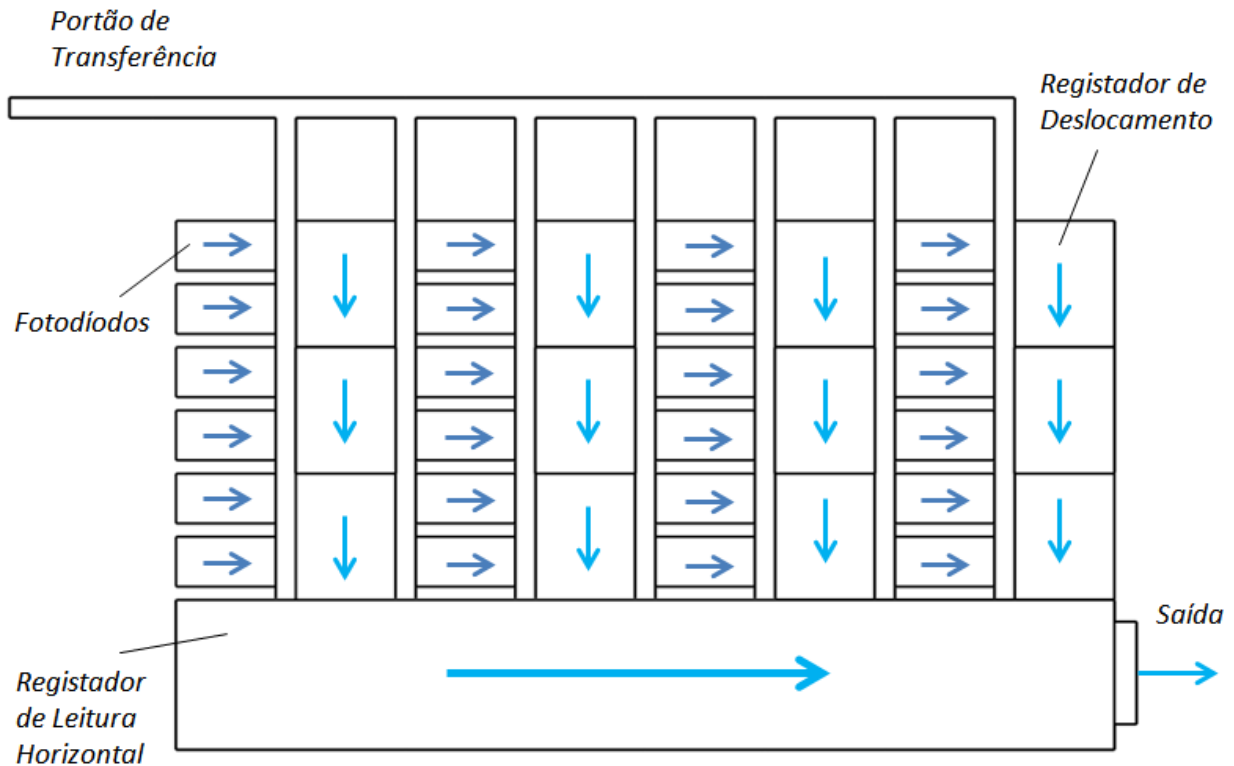


Figura 2.19 - Arquitectura "Interline Transfer" das Câmaras CCD (adaptado de [13])

2.5.1.1.1.3. Tempo de Voo

O *Tempo de Voo* é um método óptico activo que permite determinar a localização de pontos superficiais de um objecto através do tempo percorrido por um flash de luz. O método é usado principalmente na digitalização de objectos de grande dimensão e dispostos a uma longa distância, como por exemplo, edifícios e pontes.

Este método baseia-se na medição da quantidade de tempo que um impulso de laser de radiação electromagnética, i.e., flash de luz, demora a percorrer a distância desde o seu ponto inicial no scanner (onde é emitido o flash) ao objecto, até regressar de novo ao scanner (onde o flash é recebido). Os scanners baseados neste método executam por segundo, entre centenas a milhares de medições devido à velocidade da luz, no entanto apenas conseguem capturar a geometria dos objectos, não sendo possível recriarem a textura dos mesmos.

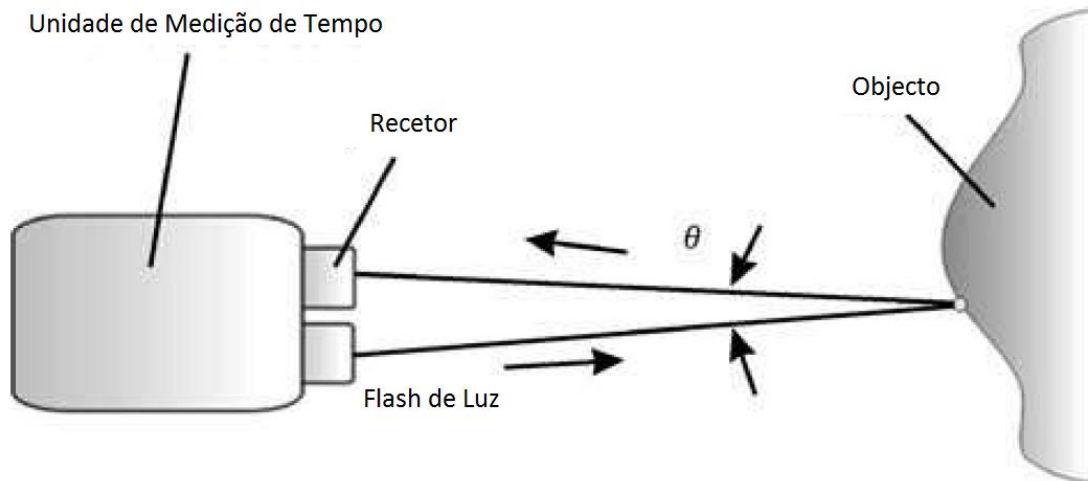


Figura 2.20 - Princípio dos Scanners de Tempo de Voo (adaptado de [10])

Conhecendo o valor da velocidade da luz torna-se possível medir a distância que separa o objecto do scanner e assim determinar os valores das coordenadas da superfície. A expressão (2.1) apresenta essa mesma relação, onde a distância D entre o scanner e o ponto da superfície é dada pela velocidade da luz C multiplicada por metade do tempo total da viagem t do flash de luz:

$$D = C \times \frac{t}{2} \quad (2.1)$$

O ângulo θ que resultada da viagem do flash (Figura 2.20) é considerado muito pequeno, não tendo, para efeitos práticos, alterações na precisão das distâncias calculadas, com os scanners baseados no *Tempo de Voo* a apresentarem uma precisão para grandes distâncias entre os milímetros e os centímetros. A precisão das medições é afectada pela largura do flash, velocidade do detector do flash e a resolução temporal, o que significa que para uma maior precisão das medições é necessário um flash mais curto e um detector mais rápido.

Existe uma variação do método, com precisões na casa dos micrómetros, em que se compara as mudanças de fase do comprimento de onda emitido e da luz recebida, sendo computadorizada a distância através dessa comparação. Este método de mudança de fase utiliza apenas uma única linha de visão para realizar o scan, permitindo que a luz laser percorra sempre o mesmo caminho entre o scanner e a superfície, levando a que seja possível definir cavidades, dentro de furos e superfícies côncavas.

2.5.1.1.1.4. Interferometria de Moiré

O método de *Interferometria de Moiré* consiste na utilização de feixes de luz para efectuar medições de deslocamentos planares em superfícies essencialmente planas [14]. Padrões de luz são projectados na superfície, criando sombras, e os contornos dessas sombras são capturados por uma câmara CDD. Através dessas imagens é possível calcular as coordenadas da superfície a partir da análise das distâncias entre as linhas das sombras.

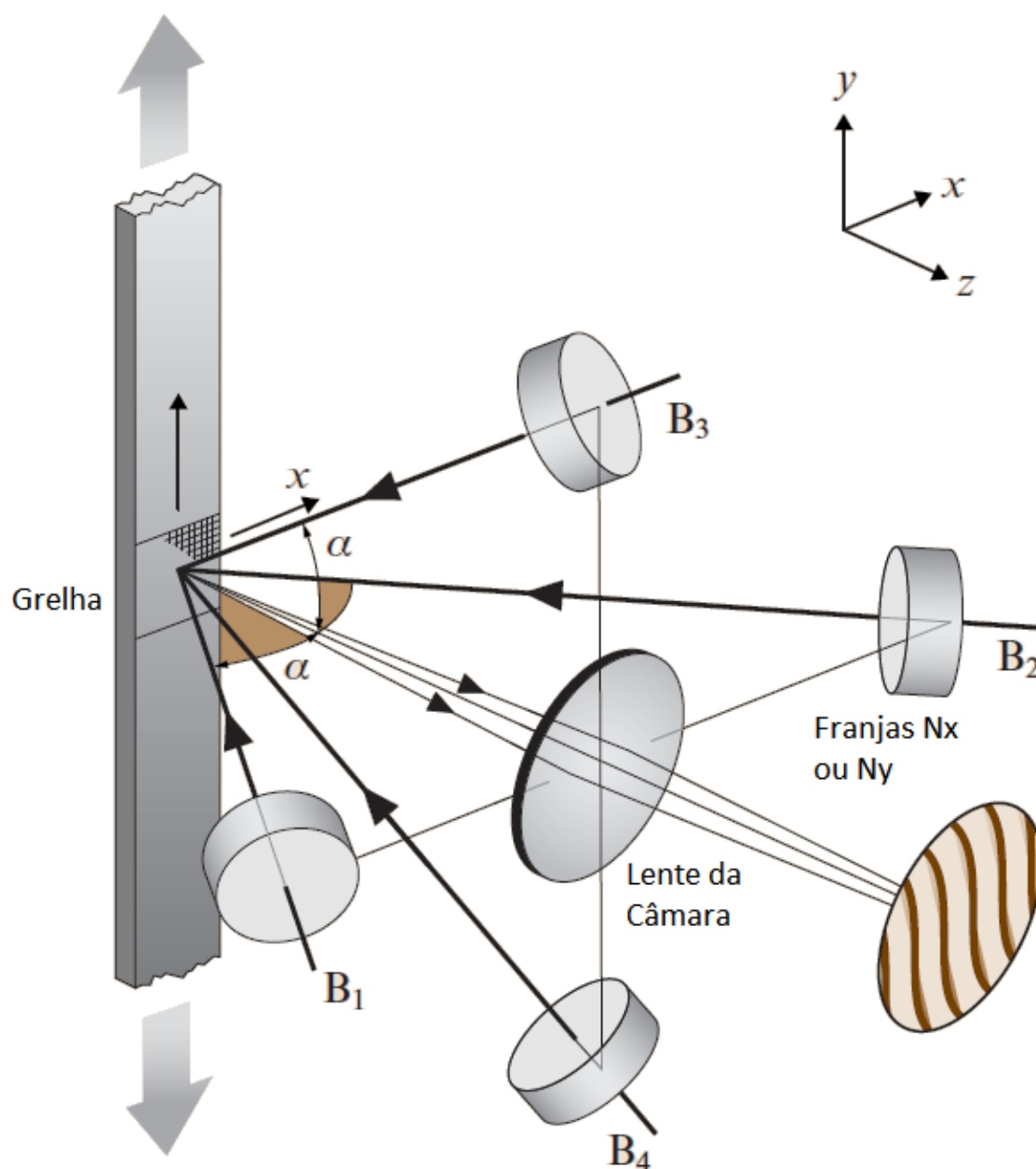


Figura 2.21 – Diagrama Sistemático para Interferometria de Moiré com Quatro Feixes (adaptado de [14])

As sombras formadas denominam-se por *franjas* (Figura 2.22) e resultam da sobreposição de diferentes padrões, podendo variar tanto em dimensões como em forma, bem como em termos de espaçamento e rotação. São projectados feixes sobre a superfície, criando uma *grelha* virtual com linhas perpendiculares ao eixos x e y . Os feixes B_1 e B_2 , ilustrados na Figura 2.21 criam a *franja* perpendicular a x , e os feixes B_3 e B_4 a *franja* perpendicular a y , identificados como *franjas* N_x e N_y respectivamente. As *franjas* são então registadas pela câmara digital.

As ordens das *franjas* são proporcionais aos deslocamentos, sendo o deslocamento no eixo x denominado por U , e o deslocamento no eixo y por V . Sendo f_g a frequência da *grelha* virtual, e que será a constante de proporcionalidade da *grelha* virtual de referência [14] :

$$N_x = f_g U \quad (2.2)$$

$$N_y = f_g V \quad (2.3)$$

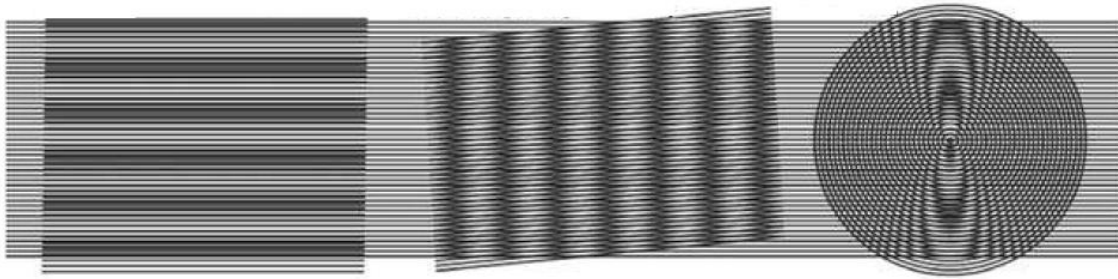


Figura 2.22 - *Franjas de Moiré*

As *grelhas* podem ser formadas pelos feixes através de interferência ou por difracção. Se for usada uma *grelha* real para obter uma *grelha* virtual, assinalada na Figura 2.23 como (BB) , então ter-se-á uma difracção, se for usado mais que um feixe, como referido acima, então está-se perante uma interferência, que resulta numa *grelha* virtual sem necessidade de se recorrer a uma *grelha* real. Relacionando o comprimento de onda λ do feixe com metade do ângulo θ de intersecção, obtém-se a frequência F_f das *franjas* (em *franjas*/mm).

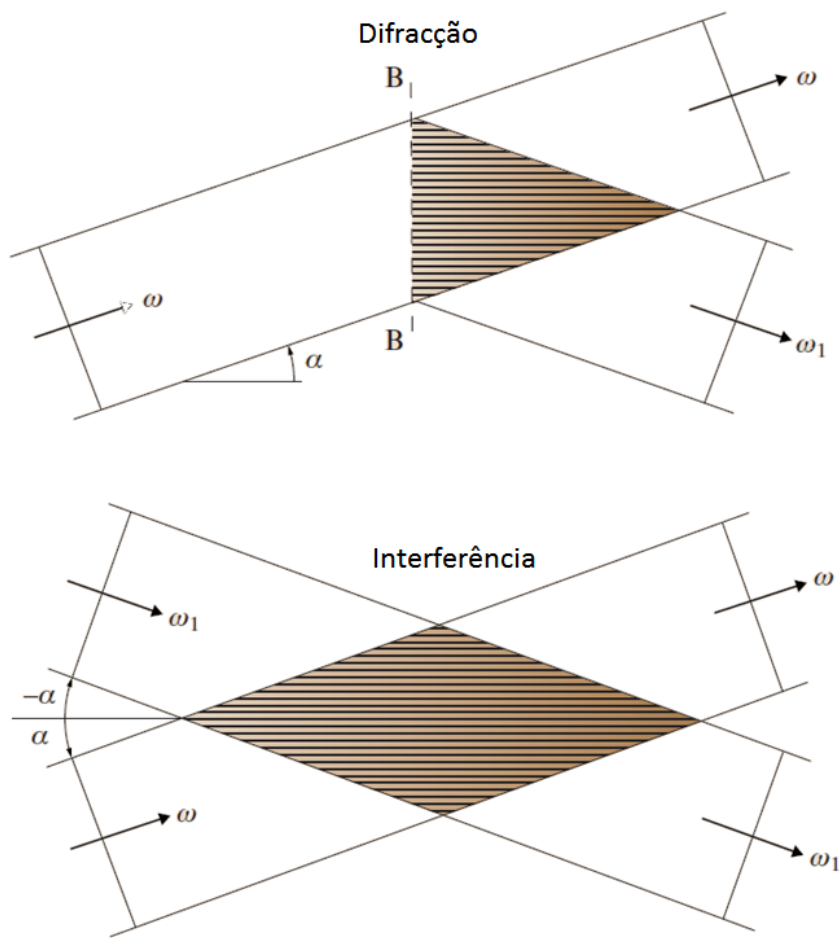


Figura 2.23 - Grelha Virtual através de Difracção e de Interferência (adaptado de [14])

A *Interferometria de Moiré* permite obter modelos a três dimensões muito precisos, no entanto, este método é apenas indicado para objectos de reduzida escala, pois para maiores objectos é necessário aumentar a distância à superfície o que implica uma grande perda na precisão. Deste modo, este método para efeitos de engenharia inversa em termos de representação geométrica, é adequado apenas para objectos pequenos e com superfícies pouco curvas.

2.5.1.1.1.5. *Structure from Focus*

Este método consiste na utilização de um conjunto de imagens de um objecto, obtidas com diferentes configurações de focagem, para estimar as diferentes profundidades dos vários pontos superficiais e assim recriar a sua superfície em três dimensões. Para cada imagem é computorizada a qualidade de focagem, e para cada pixel é seleccionado a imagem que apresenta melhor focagem, ou seja, para cada pixel é determinado a configuração de focagem que maximiza o contraste da imagem. Recorrendo às configurações da imagem seleccionada é realizado um cálculo da profundidade do pixel referido [15].

A expressão (2.4) traduz matematicamente o processo acima descrito, onde após ser computorizada a medida focal FM para cada pixel (x, y) , é seleccionado a distância focal f adequada para um número N de imagens [16].

$$f_i(x, y) = \arg \max (FM_i(x, y)), \quad \text{com } i = 1 \dots N \quad (2.4)$$

A relação entre a profundidade do objecto e a distância focal da lente, onde u é a distância entre a lente e o plano de imagem e v a profundidade do objecto:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (2.5)$$

2.5.1.1.1.6. *Structure from Defocus*

Structure from Defocus trata-se de um método que relaciona imagens focadas e desfocadas. A partir de duas imagens, I_1 e I_2 , separadas por uma distância física β conhecida, é feita uma análise à desfocagem dos pontos nas duas imagens, não sendo necessário um maior número de imagens para a representação da superfície. A Figura 2.24 esquematiza o princípio deste método.

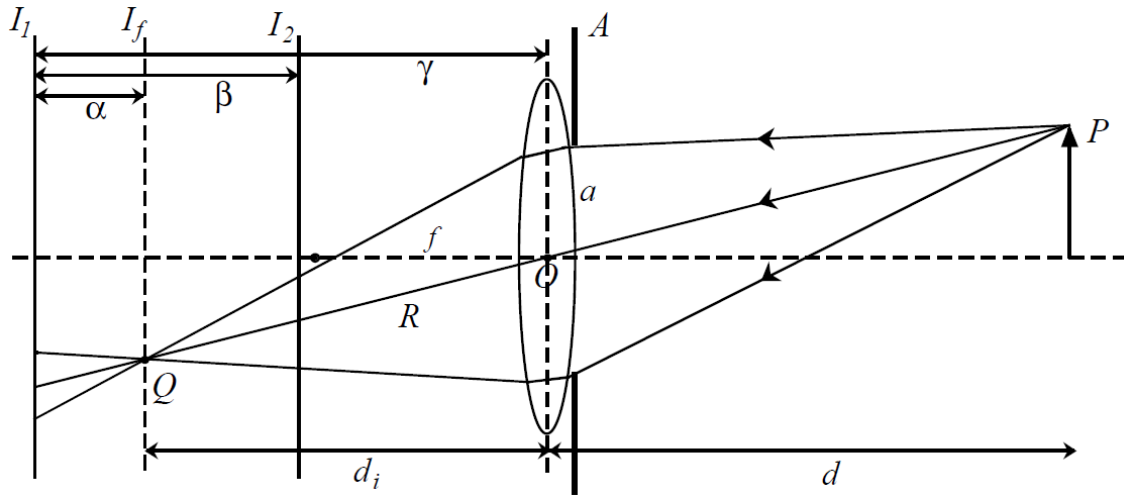


Figura 2.24 – Formação de Imagem e Profundidade no método Structure from Defocus [17]

Um ponto P pertencente a uma superfície reflete a luz que lhe é incidida, passando por uma abertura A onde será refractada por uma lente de forma a convergir com o ponto Q no plano de imagem. Seguindo o mesmo raciocínio, todos os pontos de uma superfície são projectados no plano de imagem, criando uma imagem focada I_f . Computorizando a distância α , e utilizando a expressão (2.6) da distância de imagem d_i para fazer a substituição na equação de Gauss para lentes delgadas (2.7), obtêm-se a distância d da lente ao ponto da superfície [17] [18].

$$d_i = \gamma - \alpha \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad (2.7)$$

2.5.1.1.1.7. *Structure from Texture*

Tal como os métodos anteriores, *Structure from Texture* é um método de recolha de informação tridimensional a partir de imagens bidimensionais. Através da variação de tamanho, densidade e forma dos elementos de textura é possível estimar a orientação e geometria das superfícies. Para a imagem capturada pela câmara, é necessário delinear constrangimentos geométricos no plano de imagem [19] .

Supondo uma superfície como a da Figura 2.25 (a), inclinada com um ângulo α , de forma a que o centro da câmara se encontre a uma maior distância do topo da superfície do que à base. Os discos presentes na superfície aparecem na imagem da Figura 2.26, correspondente à captura pela câmara, com forma de elipses, o que indica que a superfície não se encontra paralela ao plano de imagem. É perceptível que o tamanho das elipses decresce em função do eixo y' no plano de imagem, tendo um maior número de elipses por unidade de área na zona de topo relativamente à zona da base da superfície, originado um gradiente de densidade e um gradiente de rácio de aspecto (rácio dos diâmetros menor e maior das elipses). Sendo d o diâmetro do disco, f a distância focal da câmara e z a distância do centro da câmara ao disco, os diâmetros menor e maior, *minor* e *major* respectivamente, são dados pelas equações seguintes:

$$d_{minor}(0,0) = \frac{d f}{z} \cos \alpha \quad (2.8)$$

$$d_{major}(0,0) = \frac{d f}{z} \quad (2.9)$$

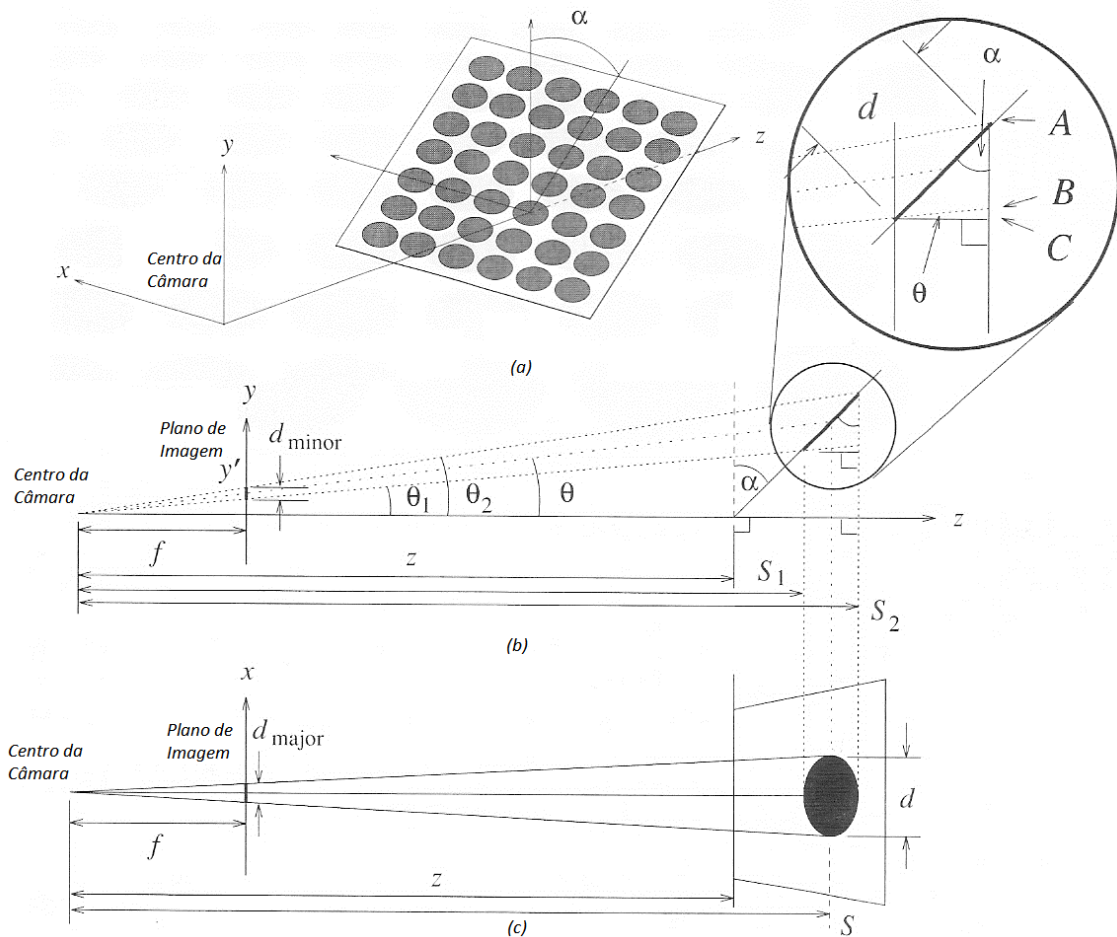


Figura 2.25 – Structure from Texture: Representação 3D do Sistema da Câmera com o Plano Inclinado; a vista yz (b); a vista xz (c) (adaptado de [12])

Considerando uma elipse com centro $(0, y')$ no plano de imagem presente na Figura 2.25 (b) e (c), com o disco a estar a uma distância do centro da câmara S em vez de z , sabendo a relação (2.10) e assumindo que o diâmetro d do disco é muito pequeno implicando que $\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta$, e portando $S_1 \approx S_2 \approx S$. Da Figura 2.25 retira-se a relação (2.11), e a partir das equações acima são estabelecidas novas expressões para os diâmetros das elipses:

$$\tan \alpha = \frac{y'}{f} \quad (2.10)$$

$$\frac{S - z}{\tan \alpha} = S \tan \theta \quad (2.11)$$

$$d_{minor}(0, y') = \frac{d f}{z} \cos \alpha (1 - \tan \theta \tan \alpha)^2 \quad (2.12)$$

$$d_{major}(0, y') = \frac{d f}{z} (1 - \tan \theta \tan \alpha) \quad (2.13)$$

Para texturas mais complexas, principalmente com vários níveis de cinzento, e imagens obtidas com ruído, torna-se necessário métodos mais precisos para delinear cada característica da superfície no plano de imagem [12].

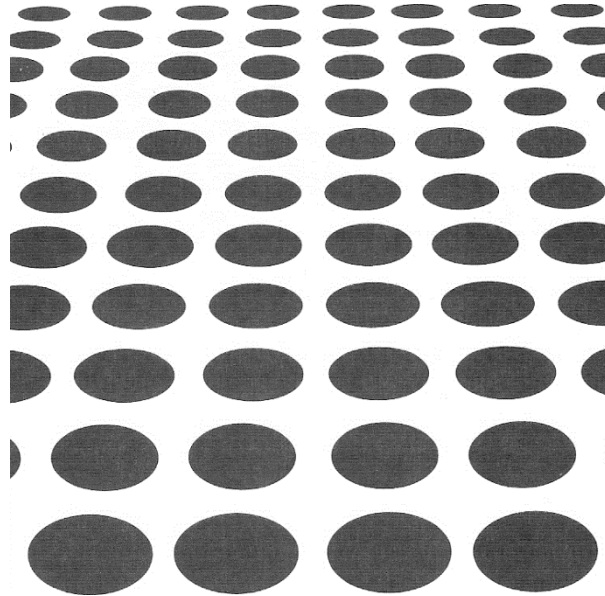


Figura 2.26 - Imagem Capturada pela Câmara da Figura 2.25 (retirado de [12])

2.5.1.1.1.8. *Structure from Shading*

Structure from Shading é um método que permite reconstruir superfícies em três dimensões, conhecendo as suas propriedades e as da iluminação incidente. A imagem obtida pelo sensor da câmara encontra-se dependente da geometria e da distribuição espectral da fonte de luz que ilumina o objecto e das propriedades da superfície, caracterizada pela sua geometria e pelas suas propriedades de reflexão. A luminosidade é convertida pelo sistema de imagem medindo na imagem a radiância, relação entre a potência incidente e a superfície [13].

A intensidade da luz incidente numa superfície é capturada pela câmara, originando um mapa de reflectância (proporção entre o fluxo de luz incidente e o fluxo de luz reflectida), onde em cada *pixel* da imagem a intensidade relaciona-se com a orientação da superfície. A equação (2.14) demonstra a radiância E na imagem capturada, relacionada com a orientação (p, q) do ponto correspondente na superfície, sendo $R(p, q)$ o mapa de reflectância da superfície:

$$E(x, y) = R(p, q) \quad (2.14)$$

Para cada ponto (x, y) na imagem é calculada a forma da superfície através da orientação (p, q) na superfície. Dependendo dos constrangimentos impostos, p.e., assumir que a superfície é totalmente lisa, são usadas equações de forma a resolver as variáveis desconhecidas da expressão (2.14). Visto que não é fácil em todas as situações controlar a luz incidente, e determinar de forma precisa as propriedades de reflexão das superfícies, este método apresenta algumas dificuldades inerentes [12].

Structure from Motion

Para o método *Structure from Motion* é dedicado um capítulo completo, onde são abordadas as suas várias etapas em maior detalhe.

2.5.1.1.2. Métodos Acústicos

Os *Métodos Acústicos* existentes para adquirir dados utilizam uma frequência acima dos vinte mil hertz, à qual se chama ultrassom, e os métodos principais em que se baseiam as diferentes técnicas são o *Sonar* e a *Ultrassonografia*.

2.5.1.1.2.1. Sonar

Sonar é um método que permite detectar e localizar objectos usando o princípio do eco, em que o sinal emitido é reflectido pelo objecto. Sonar, acrónimo para *Sound Navigation And Ranging* é usado apenas para identificar objectos à superfície da água e abaixo da mesma.

Um sinal, em forma de onda, é gerado e direccionado numa determinada direcção, e no caso de existir um objecto nessa trajectória, o sinal será reflectido (em parte ou totalmente) de volta em forma de eco e detectado por um receptor. A distância é assim determinada pela diferença de tempo entre a transmissão do sinal e a recepção do seu eco, conhecendo a velocidade do som no meio em que se propaga.

O sinal é criado através de um projector sonar, que consiste em um gerador de sinais, um amplificador e um transdutor electroacústico, sendo o receptor um conjunto de hidrofones que medem o tempo de chegada do sinal.

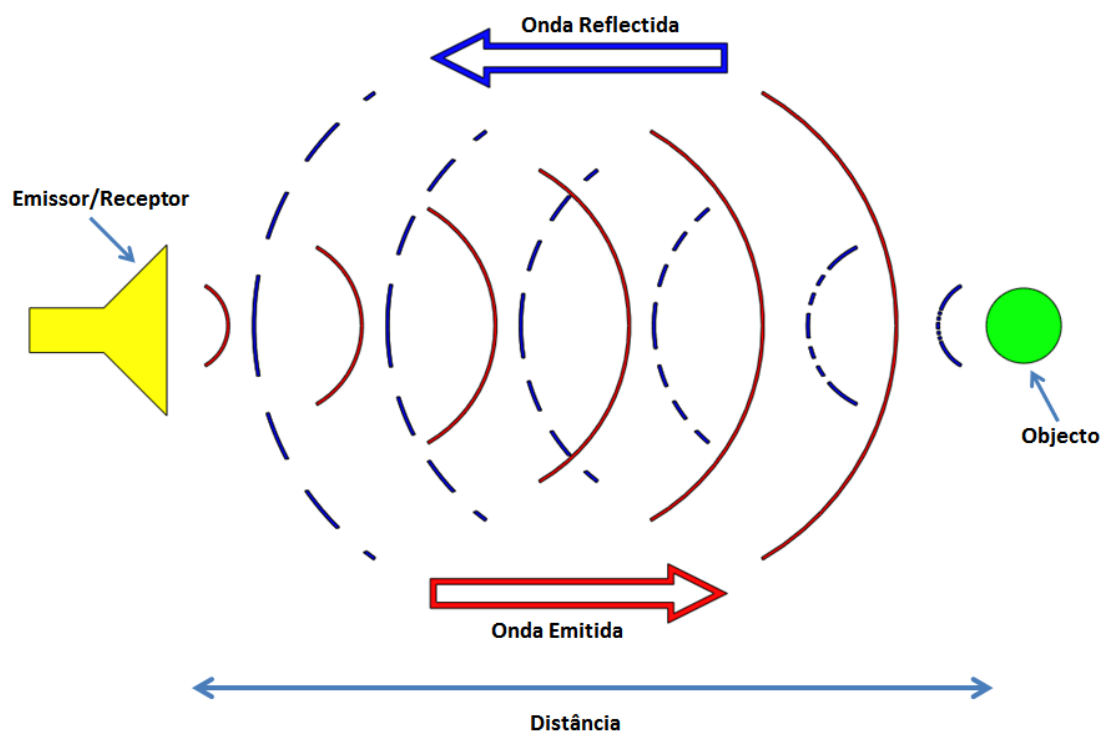


Figura 2.27 - Sonar

2.5.1.1.2.2. Ultrassonografia (2D, 3D e 4D)

A *Ultrassonografia*, também conhecida como ecografia em medicina, é um método que recorre também ao eco de sinais gerados para criar imagens de estruturas internas de seres vivos.

O seu princípio é o mesmo referido para o método *Sonar*, onde uma onda de alta frequência, entre um a vinte megahertz, é gerada e direccionada, sendo a mesma reflectida quando em contacto com certos tecidos, permitindo criar imagens a duas dimensões das superfícies. A precisão e resolução são obtidas por um aumento da frequência emitida.

No entanto é possível obter também imagens a três dimensões, inclusive em tempo real, usando a *Ultrassonografia*. Para tal, em vez das ondas sonoras serem reflectidas numa única direcção, são reflectidas em diferentes ângulos. As ondas reflectidas são recebidas e por triangulação é feita a reconstrução a três dimensões. No caso de a imagem sofrer algum atraso, devido aos cálculos necessários para determinar a sua forma ou se os mesmos forem quase instantâneos, então está-se perante uma *Ultrassonografia* a três ou quatro dimensões respectivamente.



Figura 2.28 – Imagem de uma Ultrassonografia a 3D/4D (fotografia de babyinsight3d.com)

2.5.1.1.3. Métodos Magnéticos

Os métodos magnéticos para aquisição de dados possuem várias técnicas e variações, mas essencialmente o seu princípio baseia-se em dois métodos principais: *Ressonância Magnética* e *Tomografia Computorizada*.

2.5.1.1.3.1. Ressonância Magnética

A *Ressonância Magnética* é um método que permite criar imagens de elevada qualidade de secções interiores de corpos e materiais, através de campos magnéticos e ondas rádio. Fazendo uso deste método é possível determinar distâncias na escala do nanómetro, bem como visualizar moléculas em movimento em gases, líquidos e matéria condensada [20].

O seu conceito baseia-se no facto de certos núcleos atómicos, quando posicionados num forte campo magnético externo, os seus prótons conseguirem absorver e emitir ondas que serão recebidas por antenas próximas. Usando impulsos de ondas rádio, a energia do momento angular do núcleo atómico é alterada, e através de campos magnéticos localiza-se o sinal no espaço.

Os sinais recolhidos são processados por computador, construindo assim as imagens. É comum as imagens obtidas serem imagens de cortes transversais a duas dimensões, mas a partir destas é possível obter também modelos a três dimensões.

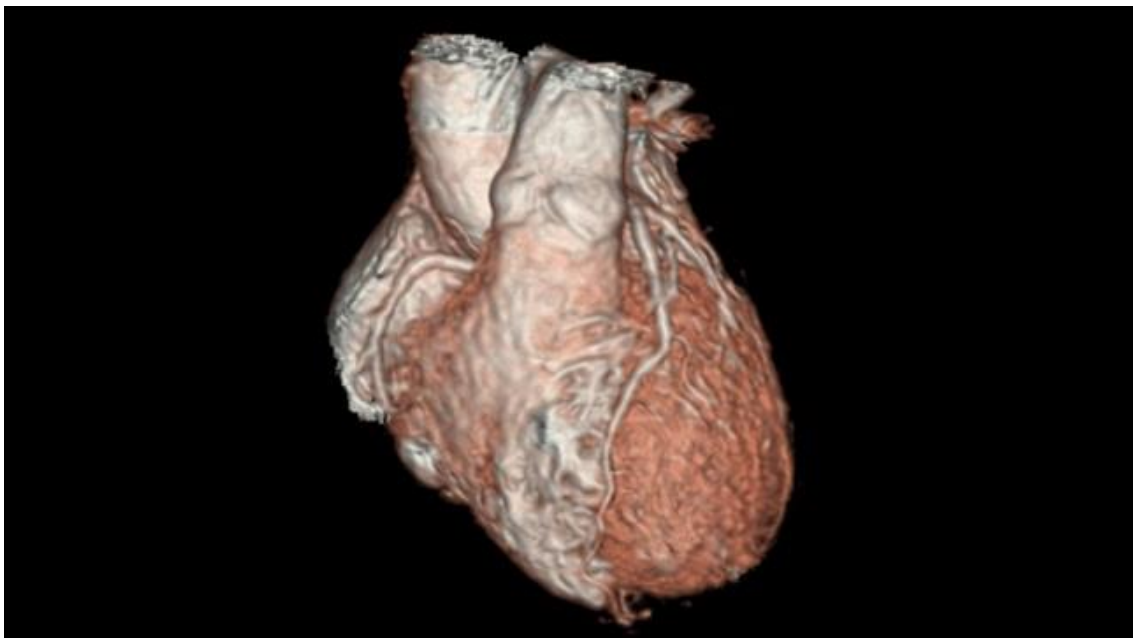


Figura 2.29 – Imagem de uma Ressonância Magnética 3D (imagem de gehealthcare.com)

2.5.1.1.3.2. Tomografia Computorizada

A *Tomografia Computorizada* trata-se de um método que permite visualizar a três dimensões o interior de um objecto ou corpo, a partir de imagens a duas dimensões de secções transversais. Para tal são utilizados feixes raio-x, projectados e absorvidos de forma diferente dependendo da composição e densidade desse mesmo objecto ou corpo. Os scanners actuais de *Tomografia Computorizada* conseguem produzir modelos com detalhes na ordem das dezenas de micrómetros, mesmo para materiais de alta densidade.

Ao longo de um eixo de rotação são capturadas várias imagens a duas dimensões, que apresentam uma escala de cor cinzenta, sendo observado a quantidade de radiação que cada parte desse objecto ou corpo absorve. Cada pixel da imagem obtida é correspondente à média de absorção na localização referente.

A projecção do feixe raio-x atravessa um plano do objecto ou corpo em diferentes ângulos, e é feita a medição da quantidade de radiação que atravessa o objecto ou corpo ao longo de várias linhas de visão, sendo construído um imagem de secção transversal, ou mapa de densidade, da superfície.



Figura 2.30 – Imagem de uma Tomografia Computorizada (imagem de maxillofacial.com)

2.5.1.2. Métodos Com Contacto

Os *Métodos com Contacto*, muitas vezes também referidos como *Métodos Tácteis*, são métodos que necessitam de contacto com a superfície de forma a capturar a sua forma. Estes métodos recorrem a dispositivos de detecção com braços mecânicos, máquinas de medição de coordenadas (CMM) e máquinas de comando numérico computadorizado (CNC). São métodos que apresentam como vantagens principais uma grande precisão nas medições, a capacidade de conseguir medir furos e ranhuras profundas, bem como poderem ser utilizados em peças transparentes ou demasiado reflectivas. Existem duas técnicas utilizadas para recolher dados das superfícies, de ponto-a-ponto e de varrimento (Figura 2.31).

A primeira técnica, de ponto-a-ponto, em que é utilizado uma sonda de contacto ponto-a-ponto instalada numa máquina CMM ou num braço mecânico. Numa máquina CMM, o percurso percorrido pela sonda ao longo da superfície é programado, enquanto usando um braço mecânico a operação é realizada manualmente. Apesar de uma máquina CMM conseguir recolher dados mais precisos, permite no entanto menos graus de liberdade no seu movimento em relação aos braços mecânicos, o que torna mais complicado a operação de aquisição de dados numa superfície mais complexa.

A segunda técnica faz uso de uma sonda de varrimento analógica numa máquina CMM ou CNC, que permite recolher dados de uma superfície de forma interrupta, em que a sonda está em contacto com a superfície de forma quase continua. A subtécnica *open-loop* permite fazer medições a alta velocidade de formas definidas matematicamente com poucas curvas e superfícies, e os movimentos da sonda são controlados pelo programa que calcula a magnitude do erro entre a verdadeira superfície e a nominal. É normalmente usada para peças com características prismáticas como furos, planos e cilindros. *Closed-loop* é a subtécnica utilizada para formas mais complexas, em que a sonda detecta as direcções da superfície e ajusta-se para manter o contacto com a peça. Adequa-se a peças com superfícies complexas, pequenas ou curvas, desde moldes e matrizes a engrenagens e pás de turbinas [21].

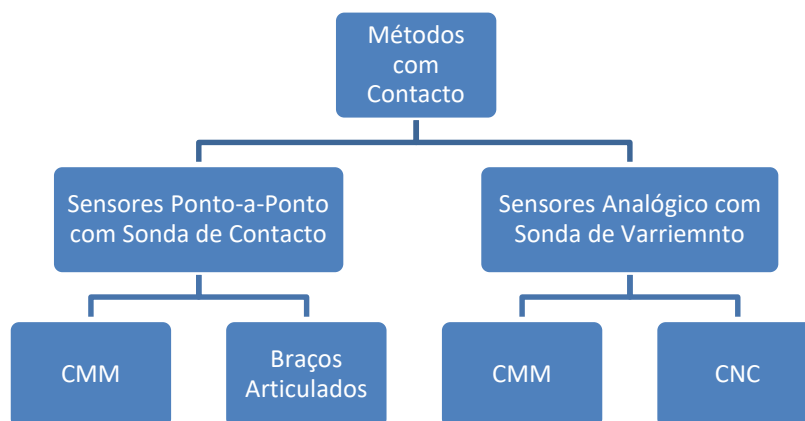


Figura 2.31 – Métodos Com Contacto

2.5.1.3. Métodos Destrutivos

Os *Métodos Destrutivos*, ao contrário dos restantes métodos referidos anteriormente, implicam a destruição do objecto durante o processo de recolha de dados das superfícies. Um conjunto de processos de *slicing* (fatiamento) e de *scanning* são realizados, normalmente por um sistema equipado com discos de corte e uma unidade de *scanning*. Em teoria todos os objectos que possam ser maquinados poderão ser utilizados com estes métodos.

O objecto é colocado numa cápsula de *epoxy*, de uma cor que contraste com o objecto, que é mantida durante cerca de oito horas num recipiente de pressão com estados alternados de pressão e vácuo. Posteriormente essa mesma cápsula é sujeita a operações de corte, normalmente recorrendo a fresas, com o objecto posicionado, preferencialmente, a um ângulo de 45° com o plano de corte.

São executados cortes por camadas, com uma espessura na ordem dos vinte e cinco micrómetros, e após cada corte é realizado um scan da superfície. No fim do processo, as imagens das diferentes camadas são combinadas para criar uma nuvem de pontos a três dimensões [22].

A Figura 2.32 ilustra o procedimento referido, onde o objecto é colocado numa cápsula de *epoxy* de cor contrastante (A), sofrendo cortes transversais camada a camada (B e C), resultando na exposição de novas faces (D).

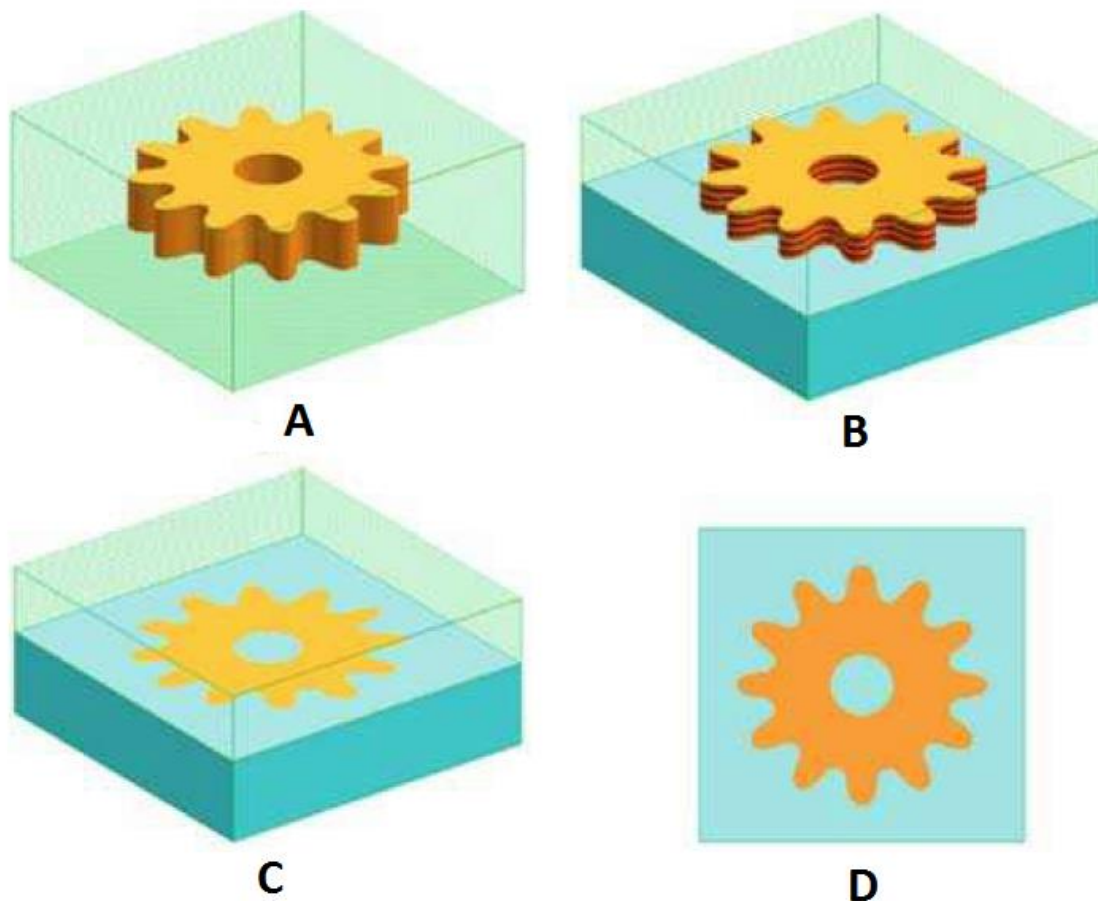


Figura 2.32 – Procedimento do Método Destrutivo (adaptado de[10])

2.5.2. Pré-processamento

Depois da aquisição de dados segue-se a etapa de pré-processamento. Esta etapa, também referida como o primeiro passo do processamento de imagem [19], tem como objectivo melhorar a qualidade das imagens recolhidas. As imagens muitas vezes encontram-se “degradadas” devido à distorção e ruído dos sistemas ópticos e electrónicos de captura de imagens. O pré-processamento, quando executado correctamente, leva a um processo de processamento de imagem menos trabalhoso, e apesar de ser possível extrair informação sem aplicação da etapa de pré-processamento, é extremamente benéfico a sua utilização quando se procura obter formas e posições precisas, bem como uma correcta medição da intensidade luminosa.

Redução de Ruído

O ruído pode ser classificado como sistemático ou aleatório. Um exemplo de ruído sistemático é o ruído periódico induzido por outros sinais eléctricos, e usando a transformada da Fourier aplicada a um sinal de vídeo, é possível detectar o ruído representado pelos altos picos de amplitude. No caso de o ruído ser aleatório a sua detecção não é possível através de transformações espaciais. Uma solução passa por utilizar os valores da intensidade luminosa para a sua detecção, correspondendo o ruído ao pixel mais claro ou ao mais escuro. Depois do ruído ser localizado, a sua intensidade é substituída por um valor resultante da interpolação da intensidade luminosa dos pixéis vizinhos [19].

Perante a situação de terem sido obtidas várias imagens, é possível utilizar uma operação de suavização, reduzindo o ruído pela *média do conjunto*.

Correcção Geométrica

Como referido anteriormente, os sistemas de imagem ópticos e electrónicos podem causar distorção geométrica. Um método de correcção passa pelo recurso ao padrão de distorção que pode ser medido pelos *pontos de grelha* (ou pontos conhecidos) no plano de visão, com as posições dos restantes pontos a serem corrigidas por interpolação, baseada nalguns pontos de grelha na região vizinha envolvente. Outro método de correcção, chamado *Resampling*, baseia-se no modelo de distorção geométrica, definido a partir de uma posição ideal (x, y) para a posição distorcida (x', y') por equações de transformação, (2.15) e (2.16). Deste modo, os pontos da imagem ficarão posicionados de forma correcta, podendo as distâncias e as áreas na imagem serem calculadas com precisão. Estas equações tratam-se normalmente de equações lineares para uma distorção de perspectiva ou de equações lineares para uma distorção devido aos componentes da câmara.

$$x' = h_x(x, y) \quad (2.15)$$

$$y' = h_y(x, y) \quad (2.16)$$

A imagem ideal pode ser recuperada a partir da imagem distorcida através da equação representada em (2.20), com as imagens ideal e distorcida designadas por f e g respectivamente.

$$f(x, y) = g(x', y') \quad (2.17)$$

A Figura 2.33 exemplifica um pixel na posição distorcida (x', y') , rodeado por quatro pixéis dispostos como resultado da intercepção de quatro rectas com as seguintes relações:

$$x_2 = x_1 + 1 \quad (2.18)$$

$$y_2 = y_1 + 1 \quad (2.19)$$

Como $f(x_1, y')$ e $f(x_2, y')$ são interpoladas, então $f(x', y')$ também será interpolada da seguinte forma:

$$f(x_1, y') = (y_2 - y') g(x_1, y_1) + (y' - y_1) g(x_1, y_2) \quad (2.20)$$

$$f(x_2, y') = (y_2 - y') g(x_2, y_1) + (y' - y_1) g(x_2, y_2) \quad (2.21)$$

$$f(x', y') = (x_2 - x') f(x_1, y') + (x' - x_1) f(x_2, y') \quad (2.22)$$

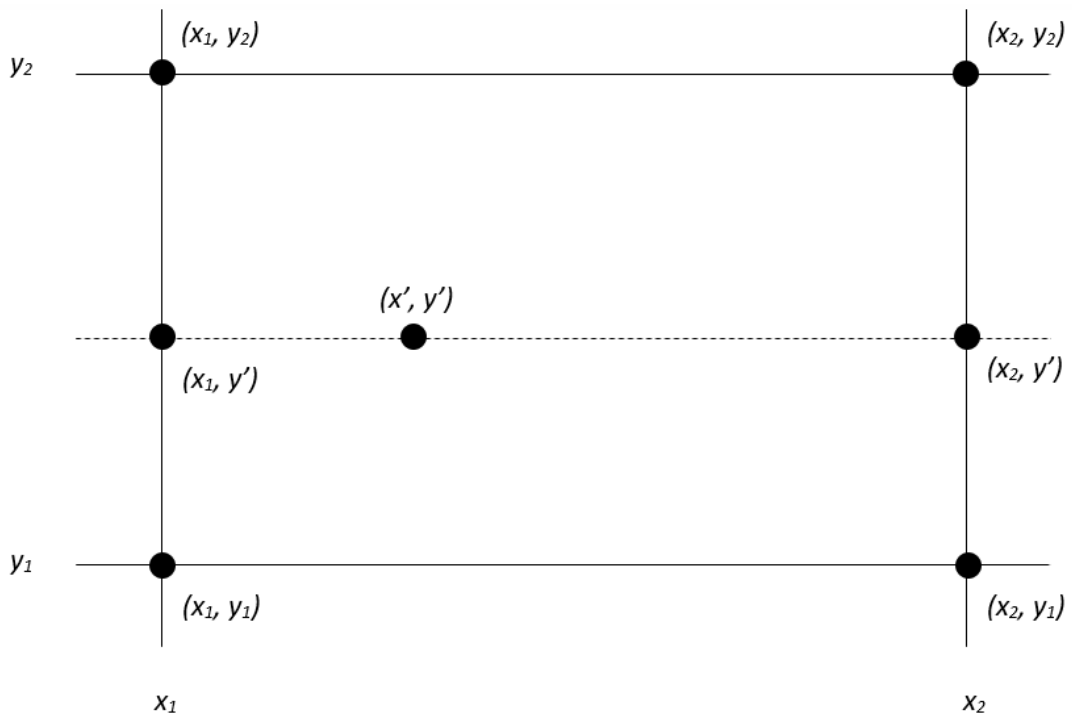


Figura 2.33 - Interpolação Baseada nos Pixels Vizinhos (adaptado de [19])

Correcção do Nível de Cinzento

A correcção dos níveis de cinzento permite compensar a não uniformidade do sistema de captura, resultando em imagens ou zonas de grande ou pouca sensibilidade à intensidade luminosa. Esta não uniformidade tanto pode ser aleatória ou sistemática (referido em algumas literaturas como *sombreamento*) dependendo da sensibilidade de cada elemento fotossensível que constitui o sistema.

De forma a contornar este problema existem vários métodos. Recorrendo a uma fonte de luz com um brilho uniforme é possível calibrar a sensibilidade dos pixéis, usando um coeficiente de escala para cada pixel, e é um método normalmente utilizado para corrigir a não uniformidade aleatória. Para uma correcção da não uniformidade sistemática é usual a aplicação de funções de transformação das duas variáveis cartesianas.

Correcção de Desfocagem

Imagens desfocadas são resultantes de sistemas de captura de imagem desfocados. Para que o ruído não aumente aquando da obtenção da imagem real, é adequado aplicar a correcção da desfocagem só após a operação de remoção do ruído. Definindo por $f(x, y)$ a imagem ideal e por $g(x, y)$ a imagem desfocada obtida [19], com esta última expressa por:

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y, u, v) f(u, v) du dv \quad (2.23)$$

Sendo que por vezes a função de propagação de pontos, h , pode ser formulada em função de $(x - u)$ e $(y - v)$ como na equação (2.24).

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x - u, y - v) f(u, v) du dv \quad (2.24)$$

Aplicando a transformada de Fourier é possível solucionar a equação de forma eficiente, obtendo resultado em (2.25), e posteriormente aplicando a transformada inversa de Fourier a $F(a, b)$ obtém-se a imagem ideal $f(x, y)$.

$$G(a, b) = H(a, b) F(a, b) \rightarrow F(a, b) = \frac{G(a, b)}{H(a, b)} \quad (2.25)$$

2.5.3. Segmentação

A divisão de uma imagem em regiões é chamada *Segmentação*, e tem como objectivo identificar subimagens que possam representar objectos ou partes de um objecto, correspondendo, idealmente, cada região a um objecto ou a uma parte do objecto. Pode-se definir uma região numa imagem como um grupo de pixéis conectados com propriedades similares. Considerando uma imagem com diferentes objectos, o primeiro passo de análise será repartir a imagem com o intuito de identificar e marcar de forma explícita as diferentes regiões que representam os diferentes objectos. A divisão em regiões é realizada a partir das características dos valores dos níveis de cinzento dos pixéis que fazem parte da imagem, e existem duas abordagens para realizar a referida divisão: Segmentação baseada na região e a estimativa da fronteira usando a detecção de arestas.

Segmentação Baseada na Região

Nesta abordagem todos os pixéis que correspondem a um objecto são agrupados e marcados, indicando que pertencem todos a uma região, sendo os pixéis atribuídos a uma determinada região através de um critério que os distingue do resto da imagem. Dois dos critérios mais importantes são o *valor de similaridade* e a *proximidade espacial*, resultando que dois pixéis com características de intensidade similar ou posicionados perto um do outro podem ser atribuídos à mesma região. Uma específica medida de um valor de similaridade entre dois pontos é, por exemplo, a diferença entre os valores de níveis de cinzento ou a sua variância em relação ao valor esperado, e no caso da proximidade espacial, são exemplos a distância Euclidiana ou a compacidade de uma região. Para recorrer a estes critérios de similaridade e proximidade, parte-se da suposição que os pontos pertencentes ao mesmo objecto irão projectar pixéis na imagem, que terão valores de níveis de cinzento próximos e que estarão perto espacialmente.

Estimativa da Fronteira Usando a Detecção de Arestas

O objectivo desta abordagem é identificar os pixéis que se encontram posicionados numa região fronteira. Estes pixéis são chamados arestas, e são localizados através da análise da sua vizinhança, visto que como estão posicionados na fronteira, e como regiões diferentes apresentam diferentes valores de níveis de cinzento, uma fronteira de uma região pode ser localizada medindo a diferença dos valores dos níveis de cinzento entre os pontos vizinhos.

Valor Limiar

O *Valor Limiar*, ou *Thresholding*, é um método para converter uma imagem em escala de cinzento numa imagem binária para que os objectos de interesse sejam separados do fundo (*background*). Para tal, é necessário que os objectos e o fundo possuam diferentes contrastes e que seja conhecida a intensidade dos níveis de cinzento dos objectos ou do fundo. O valor limiar é determinado pelas características da intensidade. Formalmente, pode-se escrever que para uma imagem binária $B[i, j]$ é o mesmo que uma imagem cinzenta limiar $F_T[i, j]$, obtida usando o valor limiar T_L para a imagem cinzenta original $F[i, j]$ [12].

$$B[i, j] = F_T[i, j] \quad (2.26)$$

No caso de se verificar a situação onde um objecto escuro se encontra num fundo claro, então:

$$F_T[i, j] = \begin{cases} 1 & \text{se } F[i, j] \leq T_L \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.27)$$

Na situação em que seja conhecido o intervalo, $[T_{L1}, T_{L2}]$, onde os valores de intensidade dos objectos se enquadram, então a expressão usada será a (2.28).

$$F_T[i, j] = \begin{cases} 1 & \text{se } T_{L1} \leq F[i, j] \leq T_{L2} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.28)$$

Se os níveis de intensidade para um objecto pertencerem a vários intervalos separados, um esquema como o apresentado em (2.29) será utilizado, sendo Z um conjunto de valores de intensidade para os componentes do objecto.

$$F_T[i, j] = \begin{cases} 1 & \text{se } F[i, j] \in Z \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.29)$$

A Figura 2.34 mostra os resultados usando diferentes valores limiares, onde a figura de topo é a imagem cinzenta original, e as restantes são imagens binárias obtidas.

Valor Limiar Automático

O valor limiar deve ser seleccionado de forma automática pelo sistema, a partir do conhecimento das características de intensidade do objecto, do tamanho dos objectos das fracções de uma imagem ocupadas por objectos, e o número de diferentes tipos de objectos numa imagem. Quando é utilizada esta informação, e seleccionado o valor limiar adequado para cada imagem, sem existir qualquer intervenção do utilizador, então chama-se *Valor Limiar Automático*. Alguns métodos utilizados em esquemas de valor limiar automático são o *Método Telha*, *Método Mode*, a *Seleção Iterativa de Valor Limiar*, o *Valor Limiar Adaptativo*, o *Valor Limiar Variável*, o *Valor Limiar Duplo*, entre outros [12].

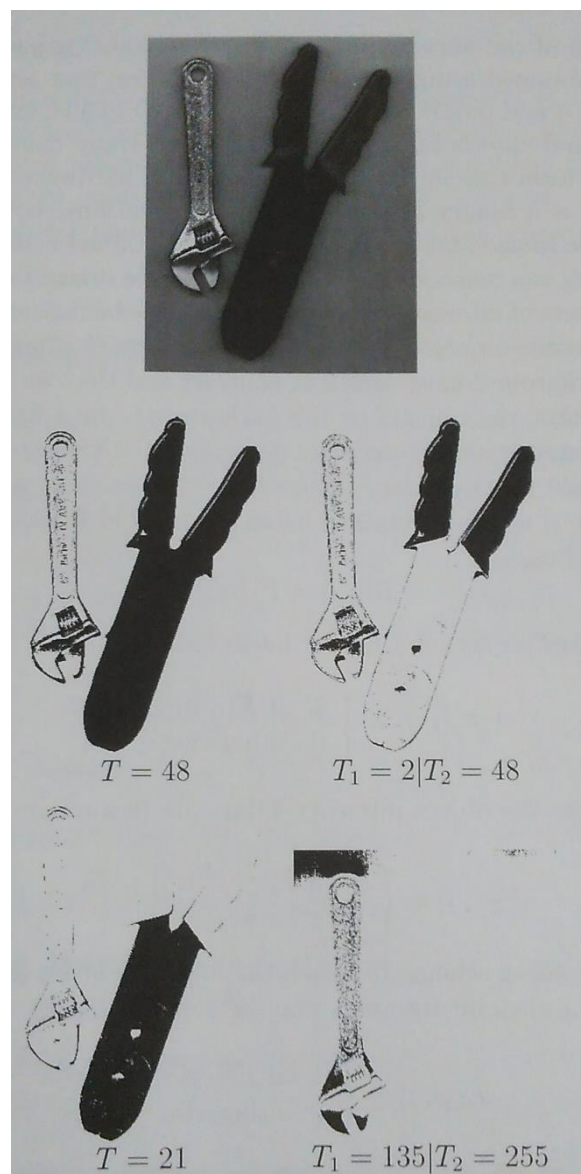


Figura 2.34 – Imagem Cinzenta Original e as Imagens Binárias resultantes Usando Diferentes Valores Limiares (retirado de [12])

3. Structure from Motion

3.1. Introdução

No capítulo anterior foram mencionados os vários métodos de aquisição de dados usados na engenharia inversa, baseados em diferentes abordagens. No entanto, é necessário fazer referência a mais um método que se enquadra dentro dos métodos ópticos. O método em questão é conhecido por *Structure from Motion*, ou por vezes noutras bibliografias como *Surface from Motion*.

O princípio do método *Structure from Motion* consiste em obter informação acerca da geometria tridimensional de um objecto a partir de imagens a duas dimensões. Para tal, é necessário determinar pontos de interesse (pontos-chave) nas imagens e correspondê-los entre duas ou mais imagens. Estes pontos de interesse detectados são normalmente pontos pertencentes a diferentes padrões de superfície, linhas ao longo de arestas ou curvas de contorno, arestas salientes ou cantos de superfícies.

As localizações destas características bidimensionais estão dependentes das coordenadas tridimensionais, do movimento tridimensional relativo entre a câmara e o objecto, e também pela geometria interna da câmara. As imagens são capturadas assumindo que o objecto de interesse se move rigidamente, ou de forma equivalente, que a câmara (ou câmaras) se move(m) em redor do objecto fixo.

3.2. Origens do Método

As técnicas *Structure from Motion* são hoje em dia aplicadas em várias áreas, e embora se possa pensar que o método *Structure from Motion* seja apenas utilizado nas décadas mais recentes, as suas origens centram-se essencialmente em dois campos principais, a fotogrametria e a visão computacional, com aplicações que datam de anos anteriores.

A ciência de fazer medições a partir de fotografias, com o fim de extrair formas e posições exactas de pontos superficiais, é definida como fotogrametria. Os primeiros passos nesta ciência foram dados na década de 1840, onde se realizaram estudos para estimar a forma do terreno utilizando fotografias terrestres e aéreas. As coordenadas correctas da estrutura e das elevações do terreno foram calculadas graças ao movimento estimado a partir das fotografias capturadas. O aparecimento da aviação e da fotografia espacial impulsionaram o desenvolvimento desta área.

Num artigo de 1976, os cientistas Morr e Poggio conseguiram obter a extracção de superfícies tridimensionais de duas imagens de forma automática. Usando um algoritmo que estabelece as correspondências entre as duas imagens, procurando pontos chaves presentes em ambas as fotografias, e recuperando as distâncias tridimensionais. Os vários desafios e avanços nos dois campos levaram à evolução e formalização da teoria *Structure from Motion* [23].

3.3. Modelo de Projecção de Perspectiva

Um ponto no plano euclidiano é representado por coordenadas euclidianas e expresso na forma $[x, y]$. O plano projectivo é obtido a partir do plano euclidiano, acrescentando para cada direcção uma recta no infinito (recta imprópria) que contém todos os pontos no infinito (pontos impróprios), e um ponto pertencente a este plano é representado por coordenadas homogéneas $[X, Y, W]$, com W sendo sempre um número real diferente de zero (pois quando W é igual a zero o ponto é representado no infinito). Pontos na forma de coordenadas homogéneas têm a particularidade de quando multiplicados por um factor comum diferentes de zero, resultarem num novo conjunto de coordenadas do mesmo ponto, ou seja, o resultado não alterará o seu significado.

As coordenadas euclidianas e homogéneas podem-se relacionar dividindo os primeiros elementos das coordenadas homogéneas pelo seu último, obtendo o ponto equivalente em coordenadas euclidianas. Por exemplo, o ponto $[3,4]$ expresso em coordenadas euclidianas pode ser representado em coordenadas homogéneas como $[3,4,1]$ ou $[6,8,2]$. Dividindo os primeiros elementos, (3) (4) e (6) (8), pelos últimos (1) e (2) respectivamente, obtém-se exactamente o ponto $[3,4]$. O mesmo raciocínio também é válido para pontos no espaço tridimensional. Formalizando assim, para um ponto numa dimensão espacial N e expresso por um vector com $(N + 1)$ elementos em coordenadas homogéneas, as suas coordenadas euclidianas equivalentes podem ser obtidas dividindo os primeiros N elementos pelo elemento $(N + 1)$ [24].

As técnicas *Structure from Motion* podem ser definidas como um problema linear ou não linear. Apesar das abordagens lineares poderem ser solucionadas através de métodos matemáticos directos, as abordagens não lineares permitem obter uma boa precisão e flexibilidade numérica mas requerem uma optimização iterativa para encontrar soluções. A maioria das técnicas apresenta um modelo de projecção como o ilustrado na Figura 3.1.

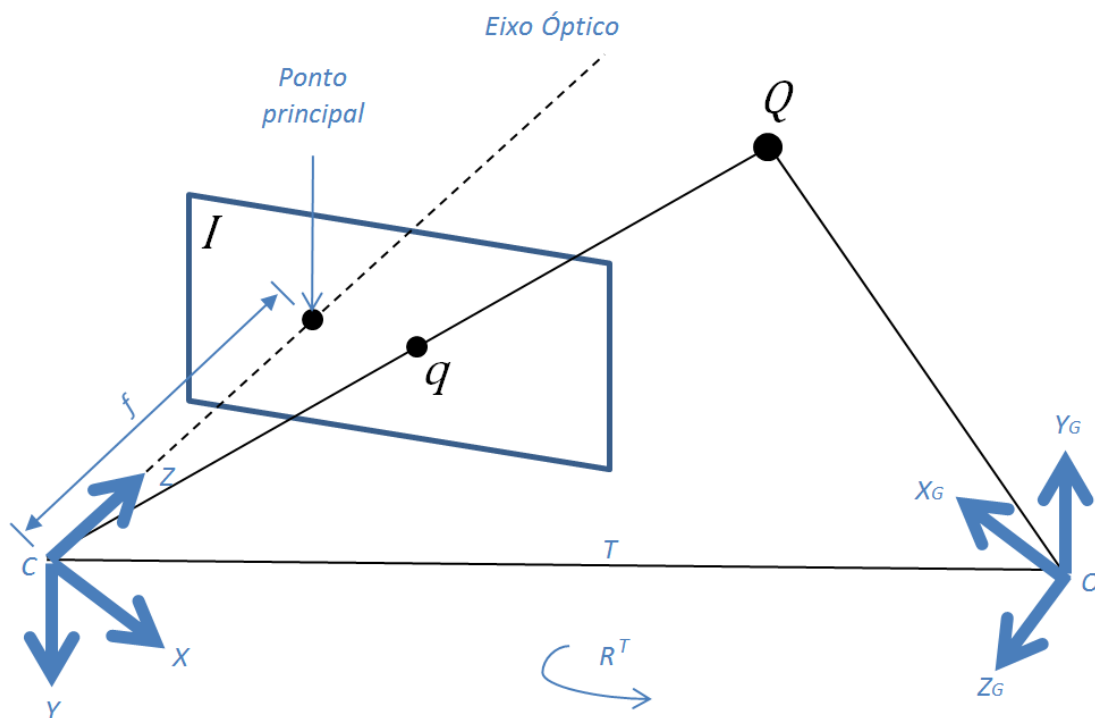


Figura 3.1 - Modelo de Projecção (adaptado de [24])

A figura apresenta um sistema de coordenadas globais definidos por $X_G Y_G Z_G$ e de centro O , e também um sistema de coordenadas pertencentes à câmara, apresentado como XYZ e de centro C normalmente referido como centro de projecção. O centro de projecção encontra-se a uma distância f (distância focal) do plano de imagem I , medida ao longo do *eixo óptico* (ou principal) tradicionalmente alinhado com o eixo Z . A projecção do ponto de centro de projecção no plano de imagem I ao longo do *eixo óptico* é chamado *ponto principal*.

Seja Q um ponto tridimensional com as coordenadas euclidianas $[X, Y, Z]$, e as coordenadas homogêneas $[X, Y, Z, 1]$, ambas obtidas pelo sistema de coordenadas da câmara. Pelo sistema de coordenadas global, o mesmo ponto homogêneo é expresso por $[X_G, Y_G, Z_G, 1]$. De forma a relacionar estas duas coordenadas representadas em sistemas diferentes, é necessário realizar uma transformação usando os parâmetros extrínsecos da câmara e a sua posição descrita.

Seja \mathbf{R} a matriz 3x3 que representa a orientação da câmara e \mathbf{T} um vector tridimensional que representa a posição do ponto de origem O do sistema de coordenadas global no sistema de coordenadas da câmara, ou seja, a rotação e a translação respectivamente. A transformação pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Feita a transformação acima, é necessário realizar uma outra operação que transforme os pontos tridimensionais do sistema de coordenadas da câmara para pontos bidimensionais no plano de imagens da câmara, o mesmo que converte $Q = [X, Y, Z, 1]$ em $q = [x, y, 1]$. Recorrendo à semelhança de triângulos, e com o auxílio da Figura 3.2, e sendo $q \equiv D$, para os triângulos apresentados tem-se respectivamente:

$$\frac{AD}{BQ} = \frac{AC}{BC} \quad (=\) \frac{x}{X} = \frac{f}{Z} \quad (=\) x = f \frac{X}{Z} \quad (3.2)$$

$$\frac{AD}{BQ} = \frac{AC}{BC} \quad (=\) \frac{y}{Y} = \frac{f}{Z} \quad (=\) y = f \frac{Y}{Z} \quad (3.3)$$

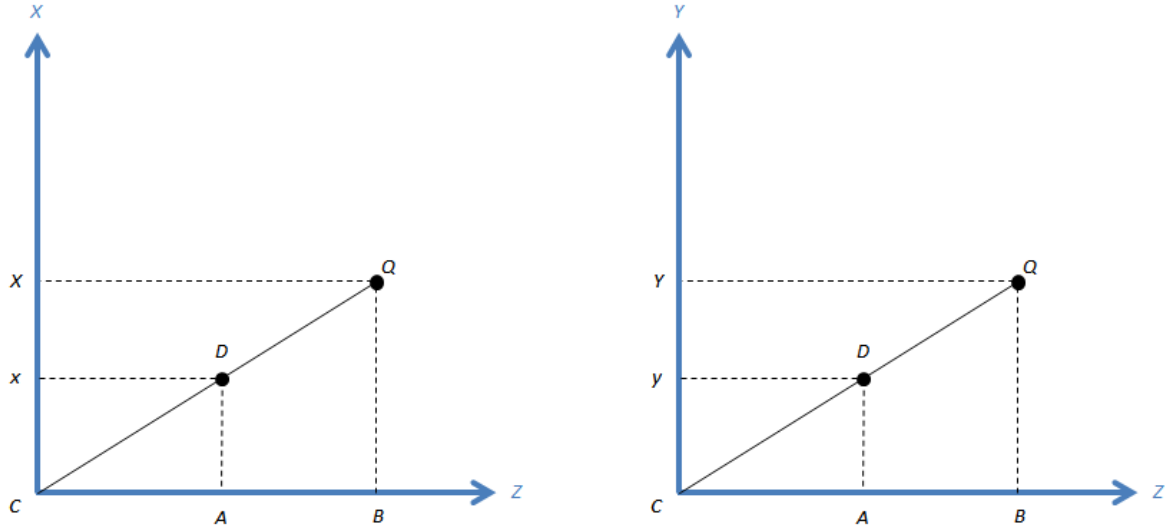


Figura 3.2 – Semelhança de Triângulos

Como dito anteriormente, em coordenadas homogêneas multiplicadas por um factor comum, diferente de zero, têm o mesmo significado. Assim, como o valor de f corresponde simplesmente a escalar a imagem, pode-se definir $f = 1$ como mostrado na equação (3.4), pois o ponto q é definido à escala, sendo independente da magnitude de Q , ou seja, depende apenas da direcção dos pontos tridimensionais relativamente à câmara e não o quão longe se encontra desta [24].

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

A última transformação relaciona os pontos bidimensionais no plano de imagem da câmara com os pixéis de coordenadas $[u, v, 1]$. Seja K uma matriz de forma triangular superior, que funciona como uma matriz de calibração da câmara, apresentada na forma da equação (3.5), onde os seus elementos são os parâmetros intrínsecos da câmara. Sendo α_u e α_v factores de escala, s o enviesamento e as coordenadas u_0 e v_0 do ponto principal. É comum assumir que os pixéis são quadrados, implicando que $\alpha_u = \alpha_v = \alpha$ e $s = 0$, e este valor de α pode ser considerado a distância focal da lente expressa em unidades de dimensão pixel.

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_u & s & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$w = Kq \quad (3.6)$$

Sendo P a matriz 3x4 de projecção, obtida pela expressão (3.7), é conveniente combinar as equações obtidas anteriormente numa equação linear (3.8), que relaciona um ponto tridimensional com a posição $w = [u, v]$ dos pixéis em coordenadas bidimensionais.

$$P = K [RT] \quad (3.7)$$

$$w = P Q \quad (3.8)$$

3.4. Distorção Radial

Quando se verifica a situação de pontos de imagem se encontrarem deslocados da posição antecipada pelo modelo de projecção ideal, está-se perante um fenómeno chamado *distorção de lente*. A forma mais usual desta distorção é a *distorção radial*, onde, como o nome indica, os pontos são deslocados numa direcção radial a partir do centro de distorção.

Assumindo que o centro de distorção é o *ponto principal*, é possível corrigir a *distorção radial* pelas expressões [24] seguintes:

$$x = \hat{x} (1 - L(r)) \quad (3.9)$$

$$y = \hat{y} (1 - L(r)) \quad (3.10)$$

Nas expressões acima, $[\hat{x}, \hat{y}]$ é a correcção do ponto $[x, y]$, com o valor r sendo conseguido pela equação (3.11), e $L(r)$ trata-se da função de distorção com os coeficientes de distorção radial, k_1 e k_2 , sendo valores dos parâmetros intrínsecos da câmara.

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (3.11)$$

$$L(r) \approx k_1 r^2 + k_2 r^4 \quad (3.12)$$

3.5. Correspondência

A correspondência de pontos é o processo de identificar pontos em duas ou mais imagens que são projecções do mesmo ponto no espaço. No entanto, devido à complexibilidade combinatória necessária, normalmente não é possível comparar todos os pixéis de uma imagem com todos os outros nas restantes imagens, além que nem todos os pontos são adequados o suficiente para o processo de correspondência.

Para contornar esta situação, o processo de correspondência detecta nas imagens, pontos de interesse (ou pontos chave). Estes pontos são detectados pelos valores máximos obtidos pela função de autocorrelação da imagem, e os seus pontos vizinhos possuem uma grande variação de intensidade luminosa, fazendo com que sejam facilmente diferenciados. Existem duas categorias para classificar as técnicas de correspondência: *Narrow Baseline Matching* e *Wide Baseline Matching*.

Narrow Baseline Matching

Assumindo que as alterações de posição e rotação da câmara são consideradas pequenas, então as zonas vizinhas aos pontos de interesse serão similares em duas imagens próximas. Centradas nos pontos de interesse são formadas janelas rectangulares que caracterizam a intensidade luminosa dos pixéis vizinhos, e as intensidades são comparadas pela correlação cruzada normalizada ou pelo erro quadrático médio. Para imagens pouco espaçadas, ou seja, retiradas muito próximas da mesma posição e com rotação semelhante, as coordenadas medidas em profundidade são bastante ruidosas.

Wide Baseline Matching

Um algoritmo de termo “wide baseline” assume [25] o seguinte:

- Para qualquer ponto, o seu correspondente pode estar posicionado em qualquer local noutra imagem;
- Os pontos vizinhos e os pontos de interesse podem apresentar semelhanças, mas como os mesmos foram transformados pelo movimento da câmara, não é possível comparar os pontos vizinhos uns com os outros;
- A câmara pode movimentar-se livremente, mas as duas imagens têm de conter os mesmos objectos vistos do mesmo lado;
- A distância focal e os restantes parâmetros internos da câmara podem mudar entre as imagens;
- Os objectos que são visíveis numa imagem podem ser ocultados noutra imagem.

Deste modo, superfícies em duas imagens podem apresentar mudanças significativas de escala, diferentes padrões de oclusão e grandes disparidades nas suas localizações. Factores que tornam extremamente difícil de determinar as correspondências correctas. As diferentes técnicas desta categoria recorrem a várias soluções para resolver estes problemas, como por exemplo, utilizando invariantes rotacionais, enquadramento de diferentes escalas, localização de planos variantes, refinação da forma de regiões de interesse, entre outras.

3.6. Geometria em Duas Imagens

Seja dado um ponto tridimensional Q com projecções q e q' em dois planos de imagem, tal como ilustrado na Figura 3.3. E sejam os pontos C e C' os centros dos sistemas de coordenadas das câmaras com os planos de imagem I e I' respectivamente. É chamada *linha epipolar* à linha p' que restringe a projecção do ponto Q na imagem I' , podendo esta linha ser vista como a recta que intercepta o centro óptico C e o ponto q na imagem I . De forma equivalente, é possível afirmar que p' é a intercepção do plano gerado pelos pontos C, C' e q com o plano de imagem I' . Todas as linhas epipolares contidas num plano possuem como ponto comum a projecção do centro óptico do plano diferente, chamados *pontos epipolares*, e e e' , para as imagens I e I' respectivamente.

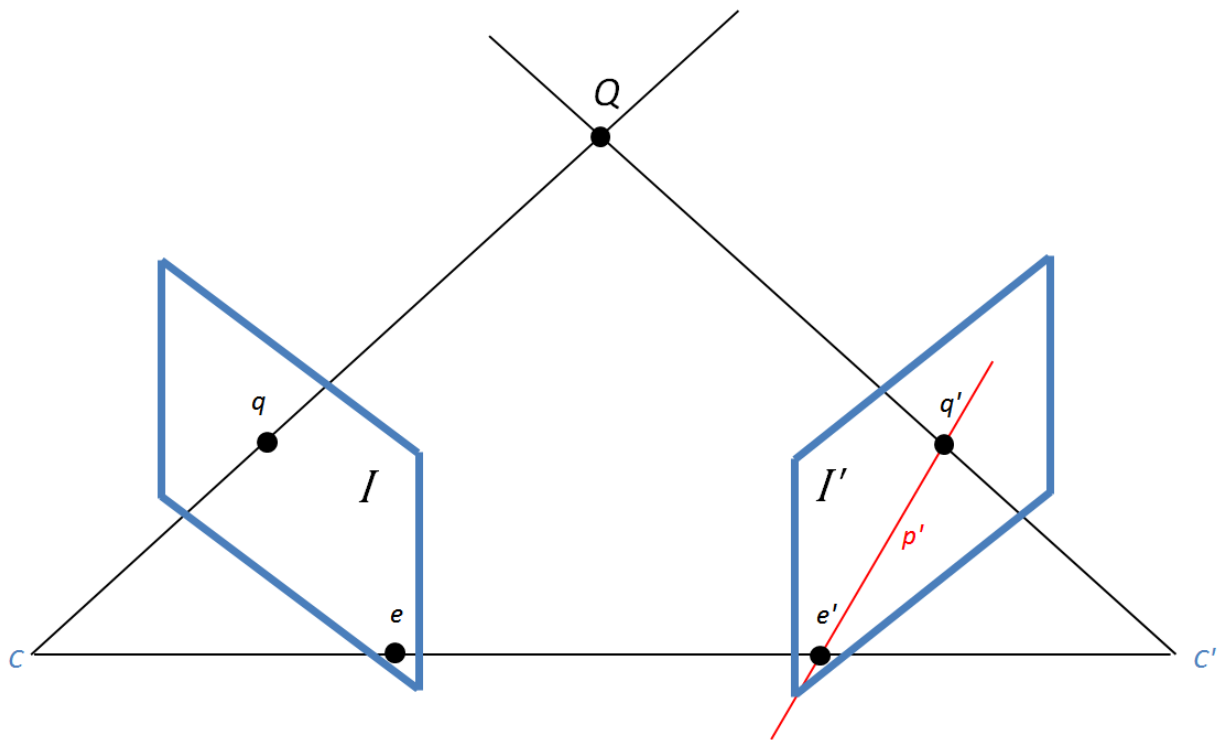


Figura 3.3 - Modelo de Projecção com Duas Imagens (adaptado de [24])

Dado então as coordenadas euclidianas do ponto Q' no sistema de coordenadas de centro C' , como o auxílio da equação (3.1), pode-se escrever que as coordenadas têm como projecção Q no sistema de centro C pela expressão:

$$Q = RQ' + T \quad (3.13)$$

O constrangimento epipolar pode ser escrito algebricamente, utilizando uma *matriz essencial* E 3x3 que relaciona os pontos correspondentes nas duas imagens, e dada pela equação (3.14), onde a matriz de translação possui a forma da expressão (3.15).

$$E = [T]_{\times} R \quad (3.14)$$

$$[T]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Assim, é possível escrever a equação (3.16), e retirar a equação do constrangimento epipolar (3.17):

$$Q^T [T]_{\times} R Q' = Q^T E Q' = 0 \quad (3.16)$$

$$q^T E q' = 0 \quad (3.17)$$

Recorrendo à equação (3.6) e usando uma matriz inversa da calibração da câmara, K^{-1} , os pontos q podem ser relacionados com as posições w dos pixéis, como demonstrado na equação abaixo:

$$q = K^{-1} w \quad (3.18)$$

Reescrevendo o constrangimento epipolar da expressão (3.17) nos termos das posições dos pixéis, tem-se:

$$\begin{aligned} (K^{-1} w)^T E (K'^{-1} w') &= 0 \\ w^T (K^{-1T} E K'^{-1}) w' &= 0 \\ w^T F w' &= 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Onde a *matriz fundamental*, F , é a expressão (3.20). A matriz F pode ser estimada linearmente, dados oito ou mais pontos correspondentes, e depende da posição relativa e da orientação do par das vistas. Decompondo a matriz fundamental é possível recuperar a movimentação da câmara e as suas matrizes de projecção. Conhecendo os valores das matrizes de calibração da câmara, K e K' , a matriz fundamental recuperada é transformada numa matriz essencial (3.21).

$$F = K^{-1T} E K'^{-1} \quad (3.20)$$

$$E = K'^T E K \quad (3.21)$$

Decompondo a matriz acima em duas matrizes correspondentes à translação e à rotação entre vistas, o resultado será a expressão (3.22).

$$E = [T]_{\times} R \quad (3.22)$$

3.7. Triangulação

A *Triangulação* é a computação de pontos tridimensionais a partir das suas posições nas imagens medidas em duas ou mais vistas, dadas as matrizes de projecção. Seja um ponto tridimensional Q como o da Figura 3.4, o mesmo pode ser computado a partir das posições medidas dos pixéis (w_1, w_2, \dots) em duas ou mais vistas (C_1 e C_2). Teoricamente, os pontos deviam estar situados no ponto de intersecção da recta de projecção com o plano, mas devido ao ruído presente, os pontos não se encontram nessa intersecção. Deste modo, a escolha de pontos tridimensionais deve ser realizada de forma a minimizar o erro métrico. Dada a expressão (3.23), onde é minimizada a soma dos erros quadrados entre a posição medida e a posição predita de um ponto tridimensional em todas as vistas onde é visível, sendo as posições medidas e preditas da vista i , respectivamente w_i e \hat{w}_i . [24]

$$Q = \arg \min_Q \sum_i \|w_i - \hat{w}_i(P_i, Q)\|^2 \quad (3.23)$$

Devido a w_i e $P_i Q$ serem paralelas, é possível escrever uma equação a partir da expressão (3.8), e como cada linha pode ser expressa como uma combinação linear das outras duas, a equação terá três linhas mas apenas duas restrições. A equação referida será então:

$$[w_i]_{\times} P_i Q = 0 \quad (3.24)$$

As restrições podem ser rearranjadas numa equação matricial (3.25), sendo A uma matriz $3n \times 3$, com n a ser o número de vistas nas quais o ponto reconstruído é visível.

$$A Q = 0 \quad (3.25)$$

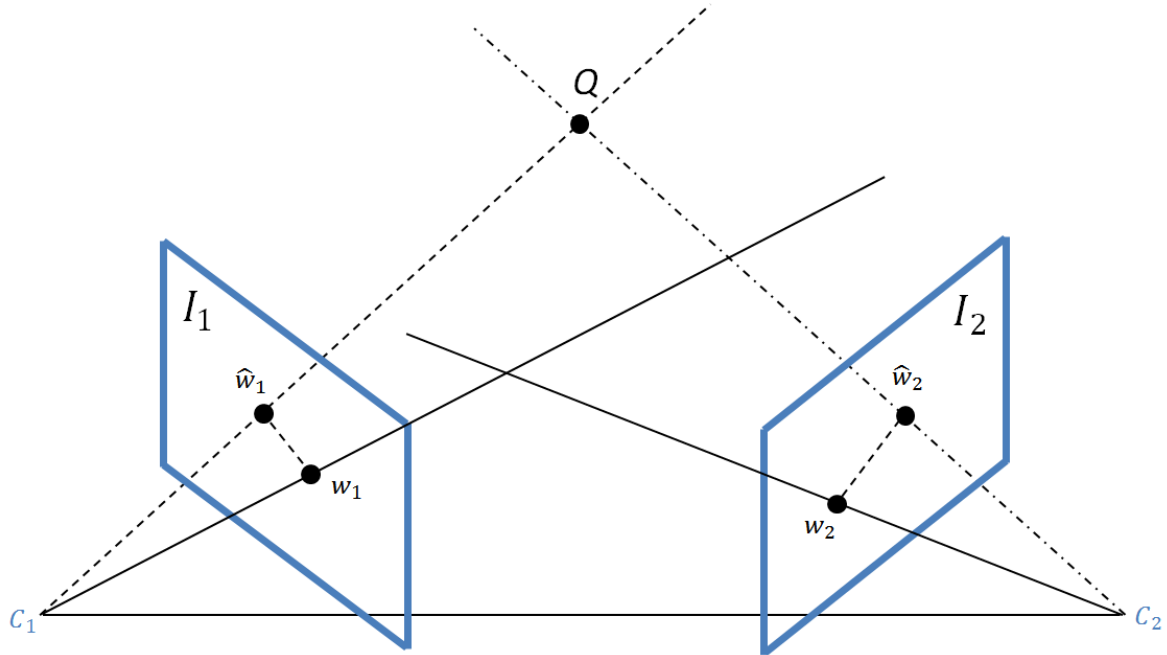


Figura 3.4 – Modelo da Triangulação (imagem adaptada de [24])

3.8. Múltiplas Vistas

Chamam-se métodos sequenciais quando se recorre a algoritmos sequenciais que registam várias vistas, uma de cada vez, para a reconstrução de pontos tridimensionais. À medida que cada vista é adicionada, pontos que sejam visíveis em duas ou mais vistas são reconstruídos por *Triangulação*, e a reconstrução é expandida parcialmente. A Figura 3.5 ilustra um objecto com 6 vistas, que são registadas uma a uma por computação das matrizes essenciais (E_{12} , E_{23} , E_{34} , E_{45} e E_{56}) relacionando cada uma com a sua precedente. Para determinar a orientação relativa e a direcção da translação, as matrizes essenciais são decompostas, e a magnitude da translação é determinada através das correspondências de três dimensões para duas dimensões. Os métodos de factorização são métodos que usando todas as medições das imagens simultaneamente, computorização as posições da câmara e a geometria do objecto. Este método tem como vantagem os erros da reconstrução poderem ser distribuídos de forma significativa por todas as medições, permitindo que sejam evitados erros grosseiros associados ao fecho da sequência. Geralmente, os métodos sequenciais são mais usados em relação aos métodos de factorização.

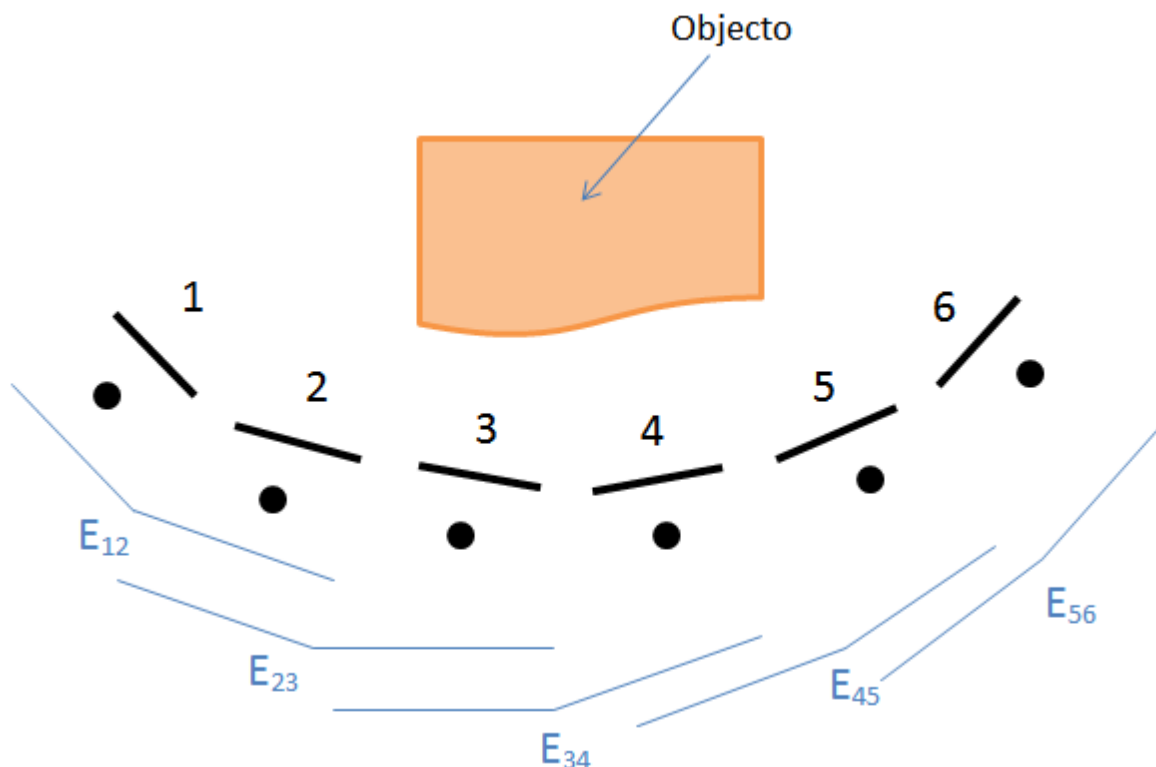


Figura 3.5 - Método Sequencial (imagem adaptada de [24])

3.9. *Bundle Adjustment*

Em traços gerais, a etapa final serve para refinar a estrutura e os parâmetros de movimento. Matematicamente, o seu intuito é determinar uma estimativa óptima de um conjunto de parâmetros ε , sendo dado um conjunto de observações com ruído. Como a maioria dos parâmetros não podem ser directamente observados, como coordenadas tridimensionais ou projecções de matrizes, é necessário fazer uma predição das quantidades que podem ser directamente observadas, tais como os pixéis medidos pertencentes às coordenadas dos pontos tridimensionais das imagens.

Sejam o conjunto de predição $p(\varepsilon)$ e o seu conjunto de observações correspondente \bar{p} , então o erro residual de predição será dado pela equação (3.26). O vector de observação \bar{p} pode ser repartido num conjunto de medições estatisticamente independentes com predições associadas [24].

$$\Delta p = \bar{p} - p(\varepsilon) \quad (3.26)$$

O processo presente na etapa *Bundle Adjustment* tem como objectivo minimizar uma função de custo apropriada, onde para uma predição por máxima semelhança, a função custo deve reflectir a verosimilhança do erro residual da predição. Assumindo uma distribuição Gaussiana das medições do ruído, a função de custo apropriada é a soma dos erros quadrados, como apresentado na expressão (3.27), onde $\Delta p_i(\varepsilon)$ é a característica do erro de predição e w_i a matriz simétrica positiva usada para aproximar a covariância do ruído associado à medição.

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{2} \sum_i \Delta p_i(\varepsilon)^T w_i \Delta p_i(\varepsilon) \quad (3.27)$$

4. Procedimento de Utilização dos Programas Computacionais de Reconstrução de Modelos 3D Utilizados

4.1. Introdução

Neste capítulo é feita a introdução aos procedimentos de utilização dos dois programas computacionais utilizados para a reconstrução dos modelos tridimensionais das peças reais. Quer o *Agisoft PhotoScan* (www.agisoft.com) quer o *Regard3D* (www.regard3d.org) são baseados no princípio apresentado no capítulo anterior, *Structure from Motion*, e o seu uso não implica nenhum investimento monetário (no caso do *PhotoScan* apenas por período limitado). São dois programas distintos em termos de resultado final, pois o *Regard3D*, também por não ser uma ferramenta profissional, tem mais limitações em termos da qualidade do modelo final, da exigência de processamento e, consequentemente a nível de tempos de execução. A interface tem algumas similaridades entre os dois, com as distintas fases a serem a identificação dos pontos-chave e triangulação para a formação de uma nuvem de pontos pouco densa, seguido de uma fase de adensamento da mesma nuvem, finalizando com a construção da superfície final.

Outros programas como o *Meshmixer* (meshmixer.com) e o *Netfabb* (www.netfabb.com), ambos de livre acesso, complementam o processo da obtenção do modelo final e análise do mesmo, tornando a reparação de malhas e conversão para sólido um procedimento rápido e eficaz, e de uma fácil manipulação e inspecção dos modelos finais, permitindo que as medições efectuadas tenham o mínimo de incertezas possível.

4.2. Agisoft PhotoScan

O *Agisoft PhotoScan* é um software de processamento fotogramétrico de imagens digitais e criação de dados tridimensionais. A versão utilizada neste estudo foi a 1.2.4 (64 bits), na modalidade de teste grátis de 30 dias, que confere todas as opções disponíveis na versão *Professional Edition* durante esse período de tempo. Este software é direccionado para várias áreas e como tal possui imensas ferramentas que não serão usadas, ou mencionadas, neste estudo.

Abaixo encontra-se representado o diagrama de processos necessários de executar para a obtenção de um modelo tridimensional de uma peça real. A etapa de *Deteccção de Marcadores nas Fotografias* pode não ser requerida na maioria das peças; no entanto, em peças com poucas saliências e cavidades na sua superfície, a juntar a uma espessura consideravelmente baixa, torna-se uma etapa extremamente necessária para que o resultado do modelo final corresponda o mais fielmente possível à realidade.



Figura 4.1 – Diagrama de Processos do PhotoScan

4.2.1. Procedimento de Utilização

O primeiro passo na criação de um novo projecto é a adição das fotografias do objecto, que poderão ser introduzidas no software através da barra superior, mais concretamente no separador *Fluxo de Trabalho*, seguido de *Adicionar Fotos...* onde se seleccionam as fotografias desejadas (Figura 4.2). Se as janelas estiverem configuradas por defeito, um botão de atalho com o mesmo símbolo estará localizado junto à árvore do projecto.

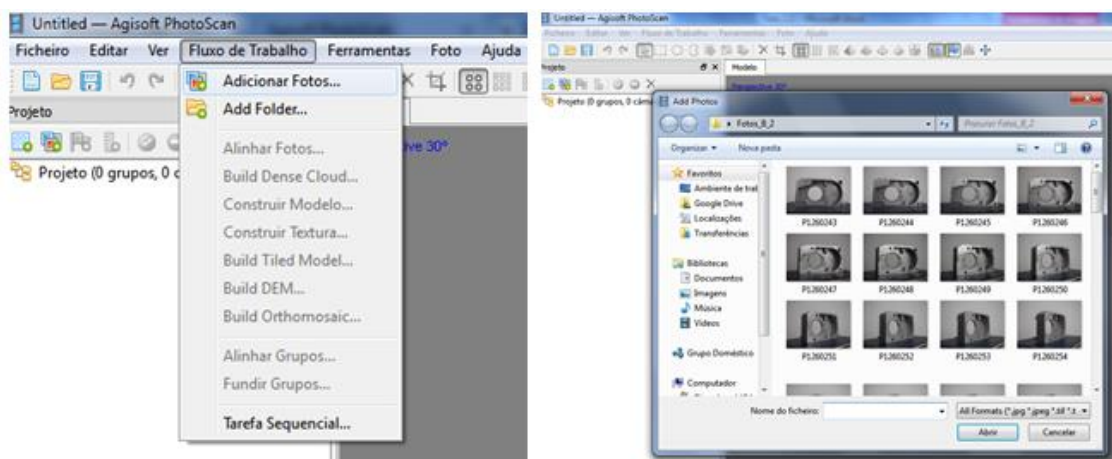


Figura 4.2 – PhotoScan: Fluxo de Trabalho e Selecção de Fotografias

Adicionadas as fotografias, na árvore de projecto aparece um número relativo a *grupo* e outro relativo a *câmaras*, tal como ilustrado na Figura 4.3. O número de câmaras é na verdade o número de fotografias que foram introduzidas, e todas tiradas por a mesma câmara, mas por defeito o programa assume, em termos de nomenclatura, que cada fotografia foi tirada por uma máquina diferente. O número de grupos não será relevante para este estudo, visto que o objectivo é obter o modelo tridimensional da peça real, e como tal todas as fotografias introduzidas terão interesse em serem trabalhadas em conjunto.

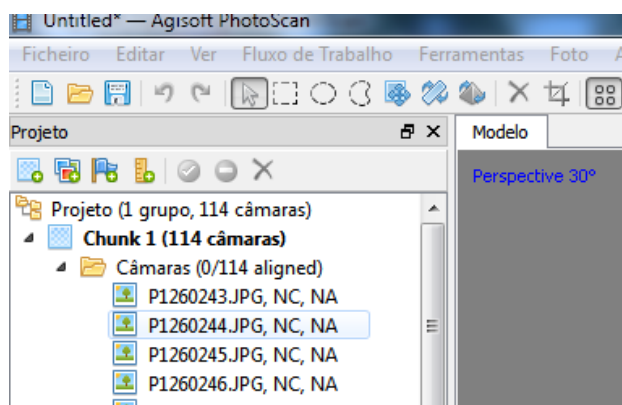


Figura 4.3 – PhotoScan: Estado das Fotografias na Árvore de Projecto

À frente do nome de cada fotografia, encontram-se duas siglas, *NC* e *NA*, que significam, respectivamente, *Não Calibrada* e *Não Alinhada*. Se os parâmetros associados à fotografia não são suficientes para estimar a distância focal, então o software assume que a fotografia foi tirada com uma lente de 50 mm, e as siglas *NC* estarão presentes até à introdução do valor da distância focal de forma manual. No entanto esse passo não é requerido para a obtenção do modelo final. As siglas *NA* apenas desaparecerão quando for executada a seguinte etapa, o *Alinhamento*.

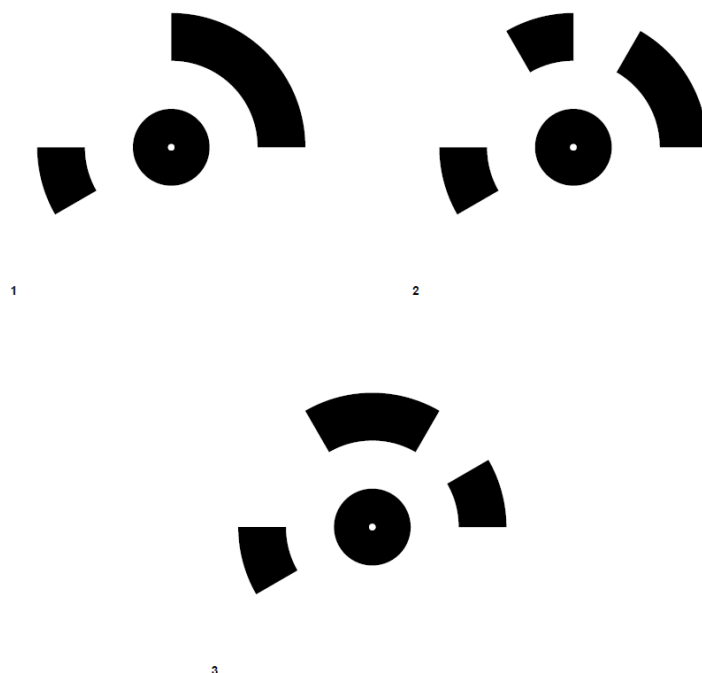


Figura 4.4 – PhotoScan: Marcadores do Programa

Em algumas situações pode ser necessário recorrer a marcadores para conseguir que o número de fotografias rejeitadas não seja demasiado elevado, o que resultaria num modelo final muito incompleto. O próprio software possui uma opção em que é possível imprimir marcadores (Figura 4.4) que podem ser detectados de forma automática. No separador *Ferramentas*, seleccionando a opção *Marcadores*, seguido de *Print Markers...* pode-se escolher vários marcadores, desde o seu tipo (12, 16 e 20 bits) ao seu tamanho. Ainda no mesmo separador existe a opção *Detect Markers...* que de forma automática detecta os marcadores, como demonstrado na Figura 4.5. No caso de se optar por não utilizar os marcadores do software, e for necessário a utilização de marcadores, é possível adicionar marcadores não físicos, i.e., marcadores apenas nas fotografias, bastando para tal seleccionar a fotografia desejada na árvore de projecto, e sob a imagem carregar no local desejado com o botão do lado direito do rato e escolher a opção *Criar Marcador*.

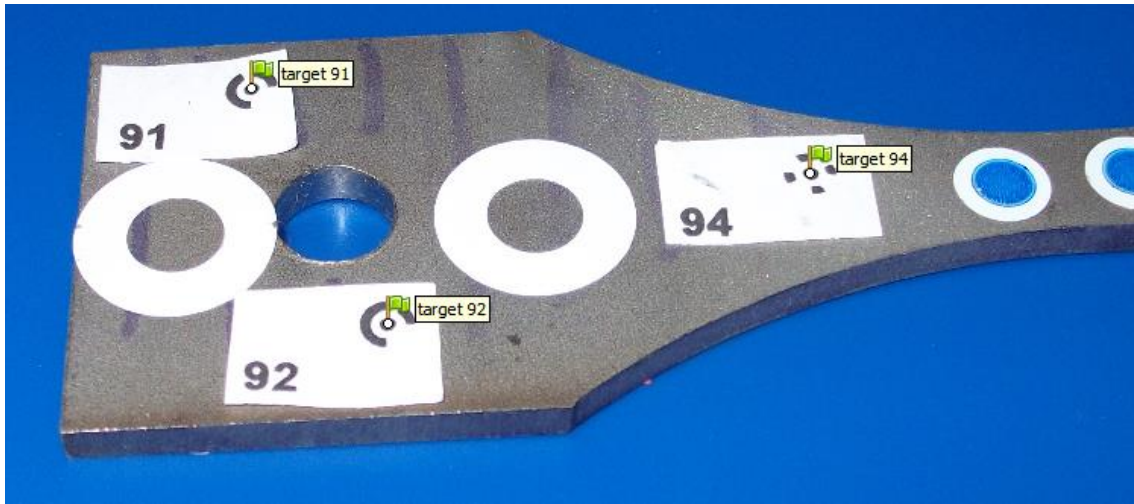


Figura 4.5 – PhotoScan: Identificação de Marcadores numa Fotografia de um Provete de Tracção Metálico, com uma Espessura de 2.46 mm

Os marcadores podem tornar-se bastante úteis em situações em que o programa não consegue alinhar as fotografias, pois não encontra pontos-chave comuns. Também se torna mais eficiente, no caso de se recorrer a marcadores físicos, que se use os marcadores do próprio *PhotoScan*. Na Figura 4.5 a peça em questão foi marcada com vários marcadores diferentes antes da utilização dos marcadores do software, e não foi possível obter o modelo final, pois a nuvem de pontos continha poucos pontos. Recorrendo aos marcadores do programa, facilmente se obtém uma nuvem de pontos com bastantes pontos suficientes para a construção do modelo final da peça, e em quase todos a detecção dos marcadores foi automática, e aqueles que por alguma razão não o foram (devido, por exemplo, a estarem colocados em zonas da peça, que em algumas fotos, não estavam focadas), foram identificados manualmente com a ferramenta de criação de marcadores.

Foto	Ajuda
	Open Next Photo PgDown
	Open Previous Photo PgUp
	Go To Next Marker Tab
	Go To Previous Marker Shift+Tab
	Navegação V
	Seleção Retangular M
	Tesoura Inteligente L
	Pintura Inteligente P
	Varinha Mágica W

Figura 4.6 – PhotoScan: Ferramentas Para a Selecção da Máscara

Importante para a obtenção de um modelo final a 360°, e com quase nenhum ruído, é a criação de uma máscara para cada fotografia, delimitando a peça do fundo ou cenário que se encontra, i.e., uma imagem que contém apenas a peça e não possui nenhum fundo. Selecionando uma fotografia da árvore de projecto, e abrindo o separador *Foto* na barra de ferramentas, ou através de um dos botões de atalho, existem quatro opções (Figura 4.6) para criar uma máscara: *Seleção Rectangular*, *Tesoura Inteligente*, *Pintura Inteligente* e *Varinha Mágica*. Estas ferramentas são extremamente úteis, e se não forem criadas máscaras para as fotografias, então o *PhotoScan* comporta-se tal como o outro software utilizado neste estudo, o *Regard3D*, e os modelos finais obtidos representariam apenas a peça real a 180°. Apesar de este ser um processo bastante moroso, é crucial para que o modelo final seja completo.

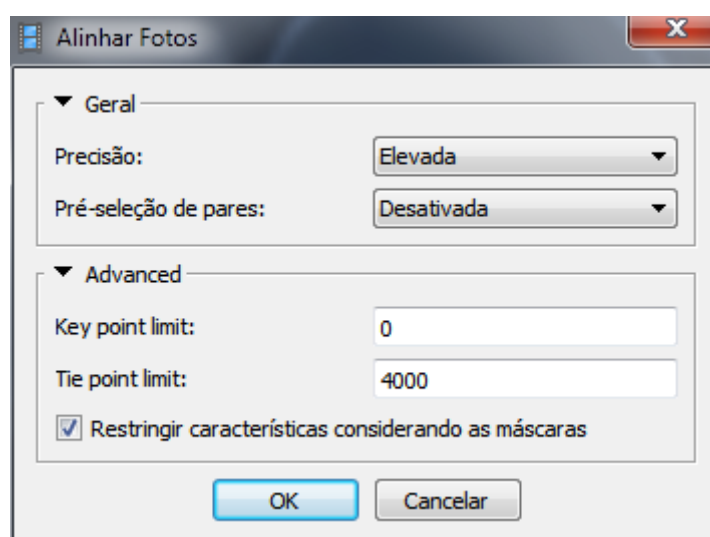


Figura 4.7 – PhotoScan: Parâmetros do Alinhamento

A etapa seguinte é o *Alinhamento*, que se pode executar através do separador *Fluxo de Trabalho* em *Alinhar Fotos...*, apresentando vários parâmetros de selecção como mostra a Figura 4.7. Nos parâmetros gerais existe a *Precisão* com cinco níveis (*Muito Baixa*, *Baixa*, *Média*, *Elevada* e *Highest*) que estima a posição de onde as fotografias foram tiradas, sendo que quanto maior a precisão mais moroso é o processo, e a *Pré-Seleção de Pares* que selecciona subconjuntos de fotografias para encontrar correspondências, com a opção *Generic* onde os pares de fotografias são seleccionados primeiro com uma precisão baixa, a opção *Reference* onde os pares de fotografias são seleccionadas usando as localizações das fotografias medidas (se esta informação estiver presente), e a opção *Desactivada*. Já nas opções avançadas é possível determinar o número limite de pontos-chave e pontos-nó, bem como a opção de *Restringir Características Considerando as Máscaras* das fotografias.

No caso dos pontos-chave, se o seu limite for definido com o valor zero, tal como na Figura 4.7, o mesmo corresponde ao valor máximo de pontos-chave possíveis e não a um valor nulo. [26] Após a confirmação destes parâmetros, é executado o processo de alinhamento, e o número de fotografias que foram alinhadas com sucesso pode ser conferido na árvore de projecto. O tempo de processamento está dependente do número de fotografias e do seu tamanho, mas também dependente dos parâmetros seleccionados, e em regra geral, parâmetros com precisões elevadas e número de limites de pontos-chave e pontos-nó elevados resultam num processo mais moroso. Na janela intitulada *Modelo* consegue-se visualizar as posições das fotografias alinhadas e a nuvem de pontos do objecto, como ilustrado na Figura 4.8.

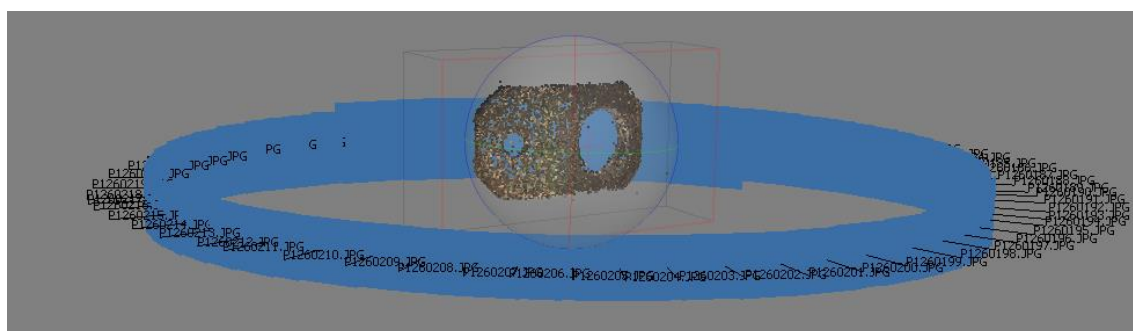


Figura 4.8 – PhotoScan: Nuvem de Pontos Obtida e a Posição das Fotografias

Posteriormente à etapa de *Alinhamento*, pode-se tentar obter logo o modelo final a partir da nuvem de pontos obtida. No entanto, para melhores resultados convém “adensar” primeiro a nuvem. Para tal, basta abrir de novo o separador *Fluxo de Trabalho* e seleccionar *Build Dense Cloud...* onde é necessário seleccionar alguns parâmetros, à imagem do que se sucede na fase de *Alinhamento*, com parâmetros gerais e avançados (Figura 4.9). Antes da execução deste comando é aconselhado redimensionar a *bounding box* (caixa delimitadora) que envolve a nuvem de pontos, visível na Figura 4.8, podendo excluir alguns pontos pertencentes à nuvem que não possuem interesse. Em relação aos parâmetros de definição, o parâmetro referente à *Qualidade*, com cinco níveis (*Muito Baixa*, *Baixa*, *Média*, *Elevada* e *Ultra Elevada*), especifica o detalhe e a precisão da reconstrução da nuvem de pontos densificada. Em termos da *Filtragem de Profundidade* (*Depth Filtering*), que calcula os mapas de profundidade para todas as imagens, existe o modo *Mild* aconselhado quando estão presentes pequenos detalhes mas de importância para o modelo final, o modo *Agressivo* quando os pequenos detalhes não são de grande importância, e o modo *Moderate* que é o nível intermédio entre os modos anteriores, bem como a opção *Disable* apenas aconselhado quando as nuvens não contêm muito ruído. A nuvem de pontos densa obtida pode ser exportada em vários formatos, incluindo .obj e .ply.

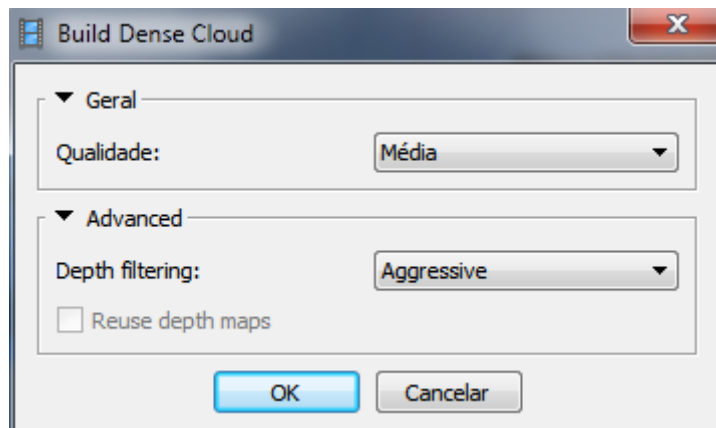


Figura 4.9 – PhotoScan: Parâmetros de Construção da Nuvem de Pontos Densa

Tendo a nuvem de pontos, densa ou não, o último passo é a construção do modelo tridimensional da peça real. Usando o comando *Construir Modelo...* que se encontra, mais uma vez, no separador *Fluxo de Trabalho*, é feita uma curta análise, de escassos segundos, antes de aparecer a janela com os parâmetros de selecção, tal como mostrado na Figura 4.10. O primeiro parâmetro geral, o *Tipo de Superfície*, com o modo *Arbitrário* adequado para qualquer tipo de objecto fechado, e com o modo *Mapa de Alturas/Terreno* que tal como o nome enuncia é direccionado para superfícies planas, tais como terrenos; o segundo parâmetro *Source Data*, onde se pode seleccionar a origem dos dados, ou seja, se a reconstrução do modelo é feita a partir da nuvem dispersa ou da nuvem densa; o terceiro, e último parâmetro geral, *Face Count* estima a quantidade máxima de faces com que o modelo final ficará, tendo como opções *Baixa*, *Média*, *Elevada* e *Custom*, esta última permitindo indicar exactamente o número de faces que se deseja. Nos parâmetros avançados, pode-se seleccionar o modo de *Interpolação*, que no caso do modo escolhido for *Enabled*, o programa irá interpolar as superfícies que se encontrem dentro de um círculo com raio determinado e centrado em cada ponto da nuvem de pontos densa. Se este parâmetro for desactivado, então apenas as áreas correspondentes aos pontos da nuvem de pontos densa serão reconstruídas. No caso de a opção escolhida for a *Extrapolação*, então o programa irá gerar um modelo sem buracos mas com a sua geometria extrapolada, levando grandes áreas de superfície a serem adicionadas ao modelo final, sem que no entanto correspondam à peça real. Existe ainda a opção de seleccionar determinadas classes de pontos, sendo necessário identificar previamente esses mesmos pontos, sendo esta opção apenas direccionada para modelos tridimensionais de terrenos [26].

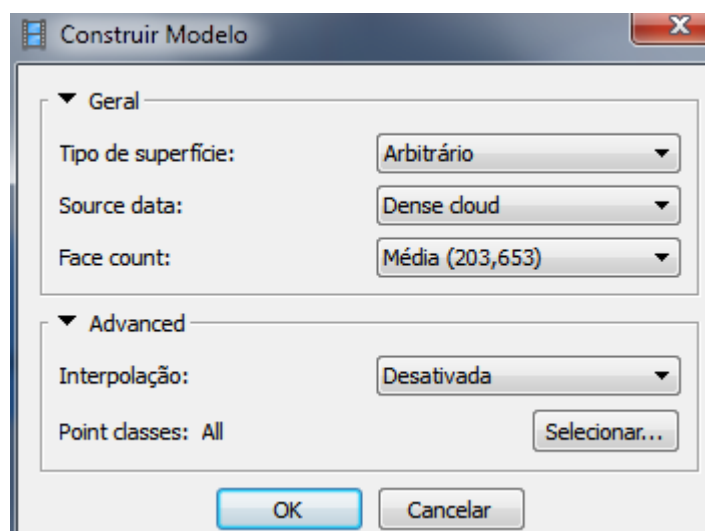


Figura 4.10 – PhotoScan: Parâmetros de Construção do Modelo

Confirmando os vários parâmetros, é obtido o modelo final, como o presente na Figura 4.11. Este modelo pode ser exportada em vários formatos, tais como os mais usados, obj, .stl, .ply, etc., e pode ser modificado a partir das ferramentas do programa, como tapar alguns buracos presentes devido a falta de informação, suavizar a superfície, reduzir o número de faces ou alterar a cor do modelo. No entanto neste estudo foi preferido utilizar outros softwares adicionais para o tratamento dos modelos, principalmente devido à capacidade de processamento exigida, e justificada essa decisão mais à frente neste trabalho.



Figura 4.11 – PhotoScan: Modelo Tridimensional Obtido com a Configuração Máx/4000 e Precisões Médias para Todas as Etapas, e já Transformada em Sólido

4.3. *Regard3D*

O Regard3D é um programa que permite criar um modelo computacional a três dimensões de objectos, a partir de fotografias tiradas de diferentes pontos de vista. Este software é a compilação de vários programas (e bibliotecas) já existentes de outros autores, que o seu criador juntou e forneceu gratuitamente no website www.regard3d.org, sendo a versão utilizada neste estudo a mais recente à data (0.9.0).

No Regard3D as fotografias utilizadas não poderão ser modificadas previamente, pois o software recorre à informação contida nas imagens sobre as condições de captura para executar cálculos, e ao contrário de outros softwares semelhantes, não contém qualquer ferramenta de edição de fotografias, nuvem de pontos ou malhas. O diagrama de processos do Regard3D encontra-se esquematizado na Figura 4.12.

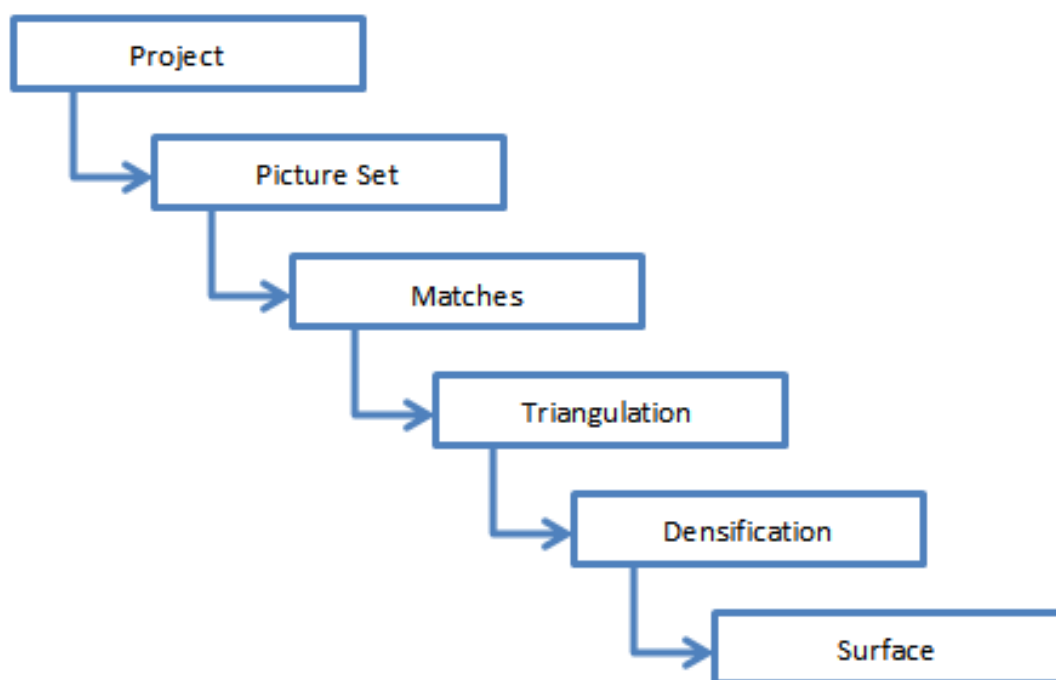


Figura 4.12 - Diagrama de Processos do Regard3D (www.regard3d.org)

4.3.1. Procedimento de Utilização

Aquando da criação de um novo projecto é necessário atribuir um nome e uma pasta de destino para o ficheiro. Na árvore situada na parte esquerda do ecrã, é criado um nível intitulado *Project* seguido do nome indicado para o projecto. No menu localizado no lado esquerdo, carregando no botão *Add Picture Set...* é possível adicionar ou remover as fotografias desejadas e onde o modelo da câmara, a distância focal e a largura do sensor são definidos através da *metadata* das fotografias. É criada uma entrada para *Picture Set* precedente de uma iteração, o que no caso de ser a primeira do projecto terá por defeito o algarismo 0, sendo que no caso de outras entradas serem criadas, estas irão apresentar os algarismos 1,2,3... e assim sucessivamente, aplicando a mesma lógica para as várias entradas dos diferentes níveis.

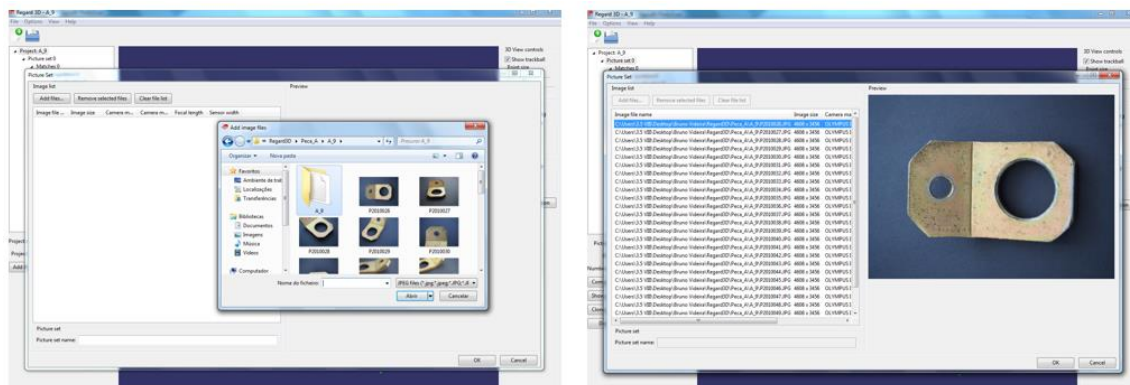


Figura 4.13 – Regard3D: Selecção de Fotografias do Projecto

Carregando em *Compute Matches...* é apresentada a caixa de diálogo da Figura 4.14, onde se pode regular dois parâmetros. O primeiro, *Keypoint Sensivity* com quatro opções (*Minimal* – 0.001, *Normal* – 0.0007, *High* – 0.0005, *Ultra* – 0.0001) que define a quantidade de pontos-chave que serão gerados, e quanto menor o valor maior será a sensibilidade, implicando um maior número de pontos-chave. O outro parâmetro, *Keypoint Matching Ratio* também com quatro opções (*Normal* – 0.6, *Higher* – 0.7, *High* – 0.8, *Ultra* – 0.9), define a relação necessária que determina a qualidade da correspondência entre dois pontos similares para serem válidos.

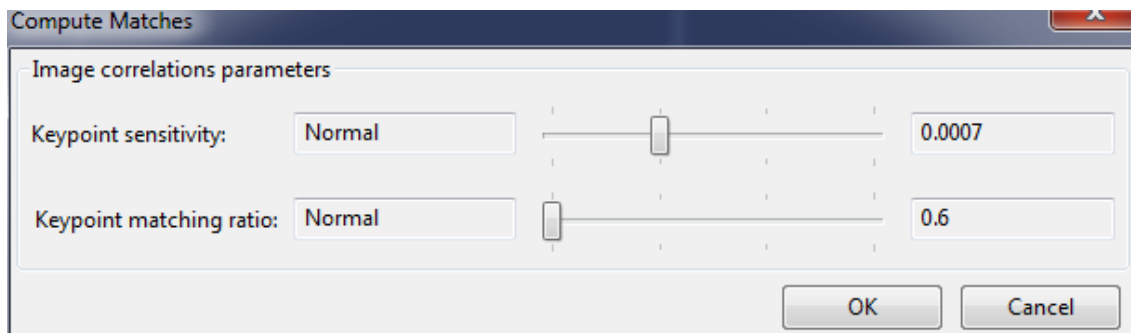


Figura 4.14 – Regard3D: Parâmetros das Correspondências

É então obtido o nível Matches, e na opção *Show Matching Result* é apresentado o número de correspondências para os pares de fotografias filtradas por quatro opções (*No Filter*, *Matriz Homográfica*, *Matriz Fundamental*, *Matriz Essencial*).

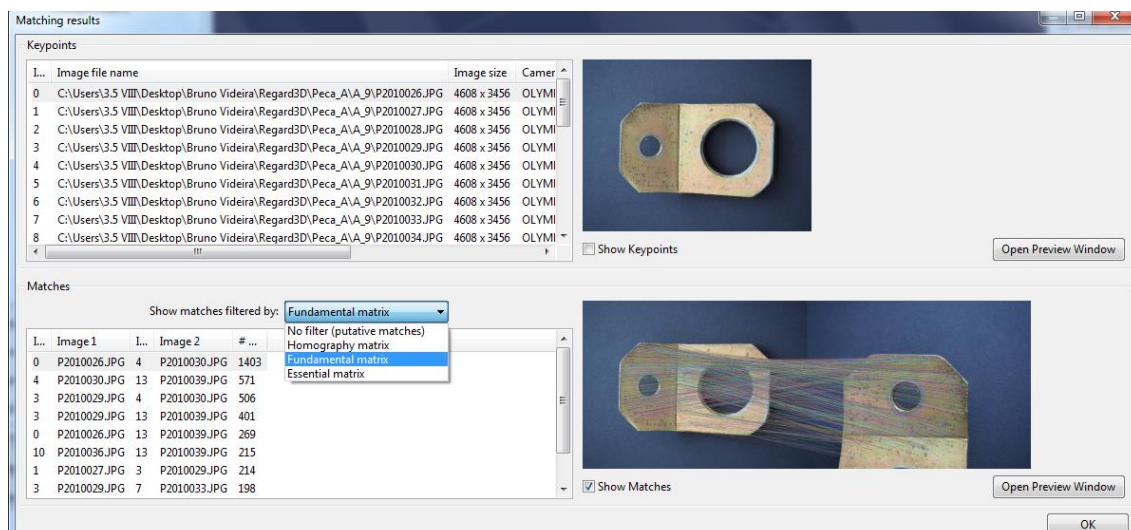


Figura 4.15 - Regard3D: Resultados das Correspondências

No mesmo menu, ao seleccionar a imagem pretendida é mostrada a imagem original e activando a opção *Show Keypoints* os pontos-chave detectados de cada uma das quatro opções acima referidas são identificados na mesma imagem. A Figura 4.16 ilustra uma imagem com os pontos-chave identificados. Como se pode observar, alguns pontos identificados pertencem à superfície onde assenta o objecto, não sendo no entanto pontos desejadas, e assim considerados como *ruído*.

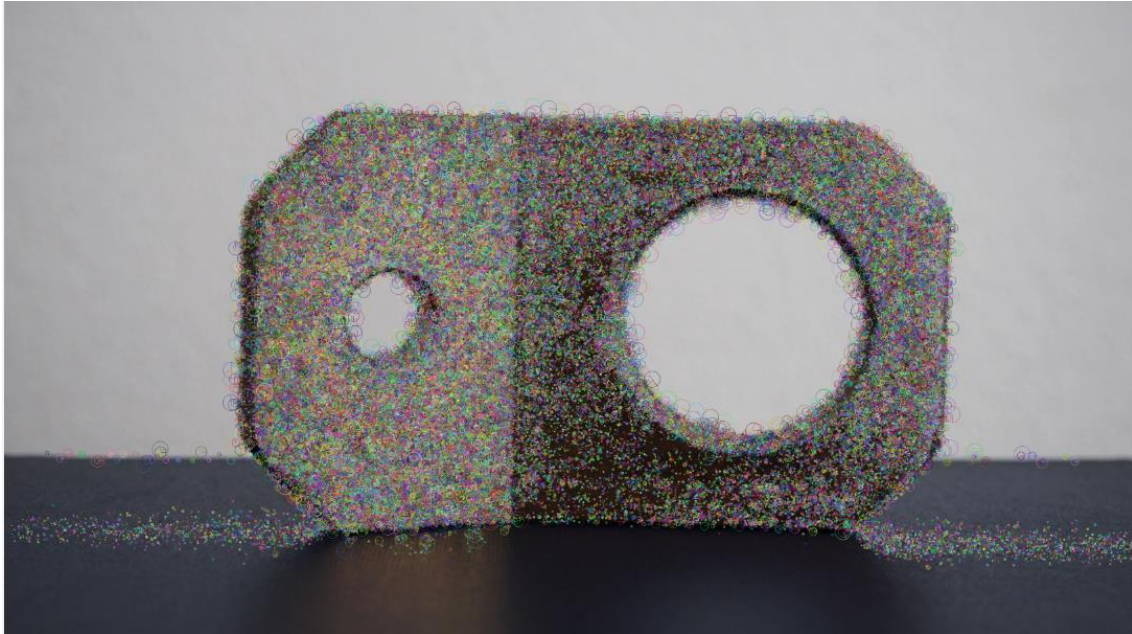


Figura 4.16 - Regard3D: Keypoints Detectados numa Imagem

Na Figura 4.17 são apresentadas as correspondências identificadas entre duas imagens, no caso concreto para pontos pertencentes à matriz fundamental. Entre estas duas imagens apenas existem 150 correspondências, e é visível que grande parte da superfície do objecto não contém qualquer correspondência encontrada. Para uma superfície totalmente definida, é importante que o número de correspondências encontradas na superfície do objecto seja não só em número elevado mas também que abranjam quase toda a sua totalidade de forma a evitar uma representação da superfície final que contenha vários buracos por ausência de informação.

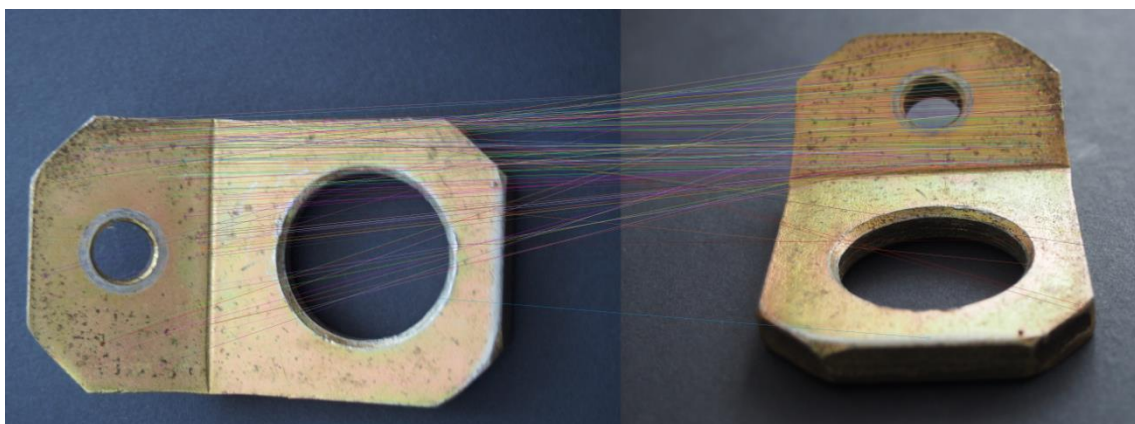


Figura 4.17 - Regard3D: Correspondências Identificadas entre duas Imagens

Segue-se a seguinte operação, *Triangulation*, onde são calculadas as localizações tridimensionais das correspondências identificadas anteriormente, as localizações tridimensionais de onde as fotografias foram tiradas, e os parâmetros extrínsecos da câmara como a definição de zoom e distorção entre outros. A partir do comando *Triangulation...* tem-se a opção de escolha entre dois métodos, *Incremental Structure from Motion* e *Global Structure from Motion*, presentes no menu de parâmetros (Figura 4.18). No primeiro método é necessário seleccionar um par de imagens, usando como critério um par que possua uma grande quantidade de correspondências e que a distância entre as duas posições de onde as fotografias foram tiradas não seja muito curta. De forma gradual são adicionadas outras imagens ao par inicial, determinando os parâmetros da câmara fotográfica e as posições tridimensionais dos pontos-chave. O segundo método utiliza um algoritmo que, usando todas as imagens num só passo, tenta encontrar os parâmetros da câmara e as posições tridimensionais dos pontos-chave de todas as correspondências. Em comparação com o primeiro método, é exigido um maior número de correspondências, no entanto trata-se de um método mais rápido. Na definição de parâmetros, para a rotação e a translação existem como opção dois e três métodos respectivamente. [27] [28] [29] [30] Existe ainda a opção de aperfeiçoar os parâmetros intrínsecos da câmara.

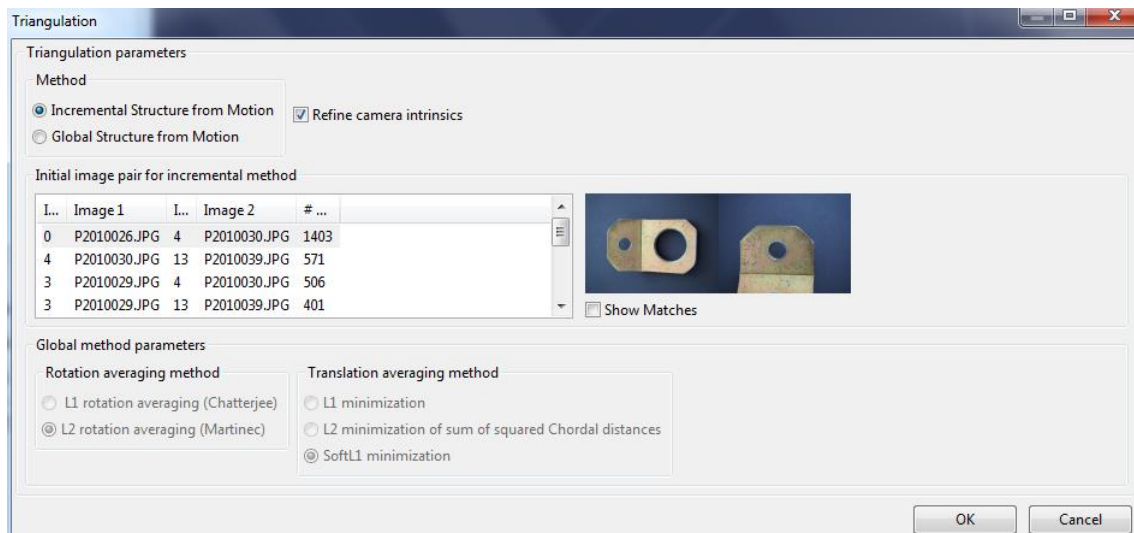


Figura 4.18 - Regard3D: Parâmetros de Triangulação

Após serem definidos os parâmetros, a operação de triangulação é executada, e no fim é apresentada, no caso de os parâmetros seleccionados serem válidos, uma janela como a da Figura 4.19. O dado mais importante nesta janela é o número de câmaras calibradas, ou seja os parâmetros e as posições da câmara em relação ao objecto que foram calculadas. Os restantes dados são os números de pontos-chave tridimensionais calculados, os erros residuais e o tempo de duração da operação.

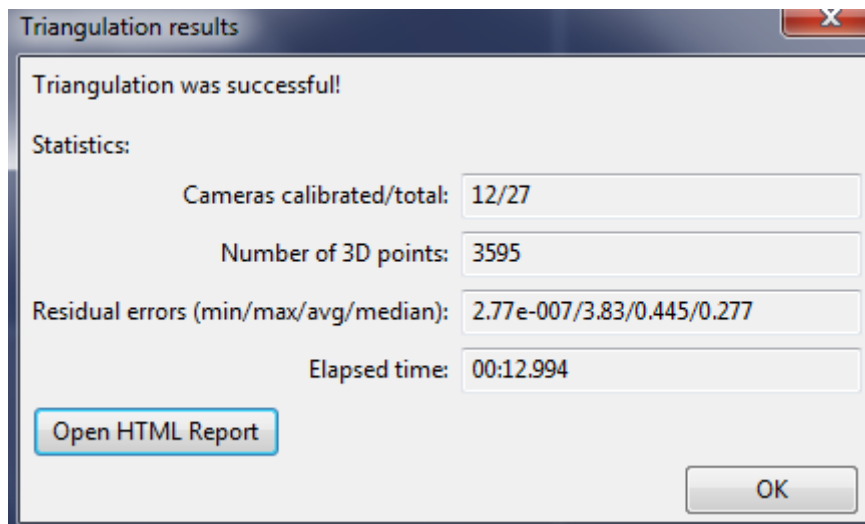


Figura 4.19 – Regard3D: Resultados da Triangulação

Os pontos-chave localizados e a posição das câmaras são visíveis na vista 3D (Figura 4.20). Os pontos-chave mantêm a cor do objecto real, enquanto as posições das câmaras são sinalizadas por pontos verdes. Os pontos-chave apresentados formam uma nuvem de pontos dispersa, e como é visível na figura abaixo, a nuvem contém várias zonas com ausências de pontos.

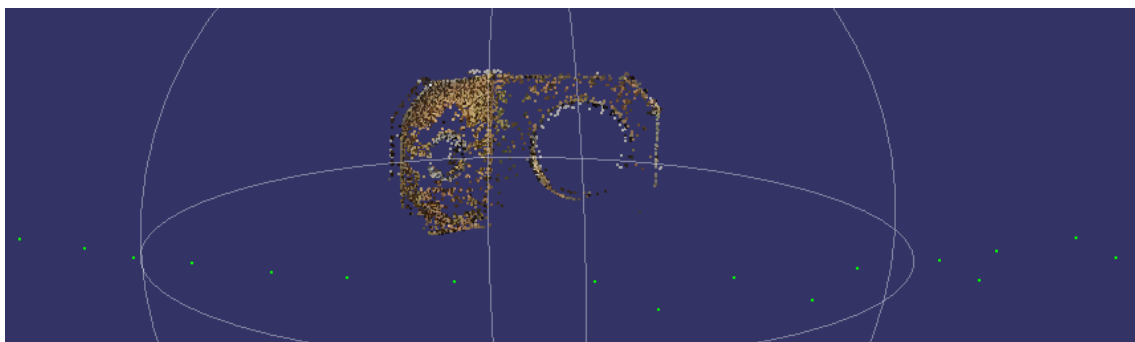


Figura 4.20 - Regard3D: Triangularização dos Pontos da Superfície e das Posições da Câmara

Usando o comando *Create Dense Point Cloud...* no menu esquerdo, é apresentado o menu de parâmetros da densificação, Figura 4.21, onde serão adicionados pontos de forma a criar uma nuvem de pontos mais densa. Estão disponíveis dois métodos de densificação: *CMVS/PMVS* (*Clustering Views for Multi-View Stereo/Patch-Based Multi-View Stereo*) e *MVE* (*Multi-View Environment*).

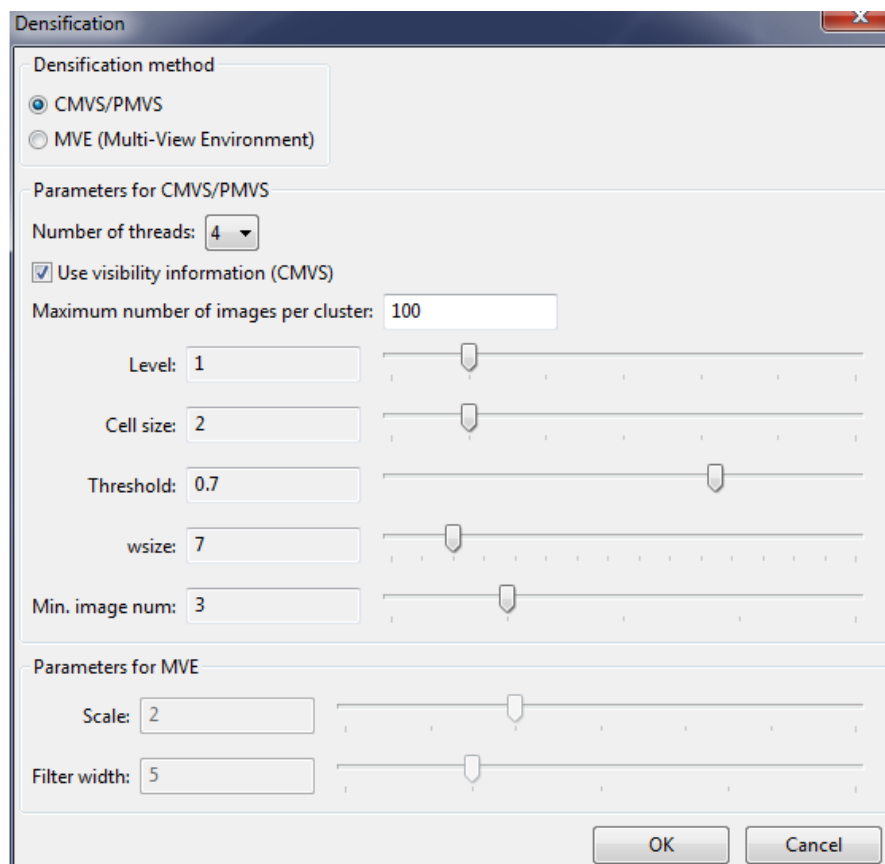


Figura 4.21 – Regard3D: Parâmetros da Densificação

Para o método *CMVS/PMVS* os parâmetros a definir são apresentados na Tabela 4.1. Os parâmetros para o método *MVE* são apenas dois: *Scale* que define a escala para a reconstrução, com valores mais baixos a traduzirem-se numa reconstrução com maior detalhe mas com um tempo de computorização do processo mais longo do que com uma escala maior; *Filter Width* (largura de filtro) que determina o tamanho de *patch* (remendo) usado para os cálculos, sendo que maiores valores implicam um melhor resultado à custa do tempo de computorização.

Tabela 4.1 – Regard3D: Parâmetros do Método de Densificação CMVS/PMVS

<i>Number of Threads</i>	O número de <i>threads</i> especifica o número de CPUs ou cores do computador.
<i>Use Visibility Information</i>	Opção que executa uma verificação de visibilidade e, se necessário, divide a operação de densificação, devendo não estar seleccionada para objectos de pequena dimensão.
<i>Maximum Number of Images per Cluster</i>	Número máximo de imagens por <i>cluster</i> , a menor porção lógica de espaço em disco que por ser alocada para armazenar um arquivo, sendo que quanto maior o número melhores resultados mas obtendo uma operação mais demorada.
<i>Level</i>	O nível modifica a resolução das imagens utilizadas, com o nível definido 0 é utilizada a resolução original, com o nível 1 as imagens terão 4 vezes menos pixéis, com o nível 2 terão menos 16 vezes menos pixéis, e assim sucessivamente, sendo que quanto mais alto o índice do nível mais rápido será o processo, no entanto as reconstruções serão mais dispersas.
<i>Cell Size</i>	O tamanho de célula controla a densidade das reconstruções, com o software a tentar reconstruir pelo menos um <i>patch</i> (remendo) em todos os quadrados de pixel com região <i>cell size</i> X <i>cell size</i> . Aumentando este valor implica reconstruções mais dispersas.
<i>Threshold</i>	Se a medida de consistência fotométrica – que varia entre mau (-1) e bom (1) – de um <i>patch</i> de reconstrução for superior a este valor então o mesmo é aceite e mantido pelo software, que repete três iterações de reconstrução em que é reduzido 0.05 no fim de cada iteração, ou seja, para um <i>threshold</i> de valor 0.50, as iterações serão 0.50, 0.45 e 0.40.
<i>Wsize</i>	Para cada imagem, o software retira uma amostra de cores de pixéis <i>wsize</i> X <i>wsize</i> para computadorizar a consistência fotométrica. No caso de um valor de <i>wsize</i> igual a 5 ter-se-á uma amostra de 25 (5x5) cores de pixéis em cada imagem.
<i>Minimum Image Number</i>	O número mínimo de imagens onde um ponto tridimensional tem de ser visível para ser reconstruído. No caso de imagens com fraca textura os valores deverão ser mais elevados, no valor mais baixo (2) poderá obter-se falsos pontos.

A Figura 4.22 demonstra o resultado de uma densificação, sendo nítido que existem zonas da nuvem de pontos onde não há qualquer informação mas que os contornos estão completamente definidos. De notar também o ruído presente no canto inferior esquerdo, que terá de ser removido por via de outro software adicional, não estando presente no *Regard3D* qualquer ferramenta de edição. No menu esquerdo existe a opção de exportar a nuvem de pontos obtida nos formatos *Stanford Polygon File (*.ply)*, *Point Cloud Data (*.pcd)* e *MeshLab Project (*.mlp)*.

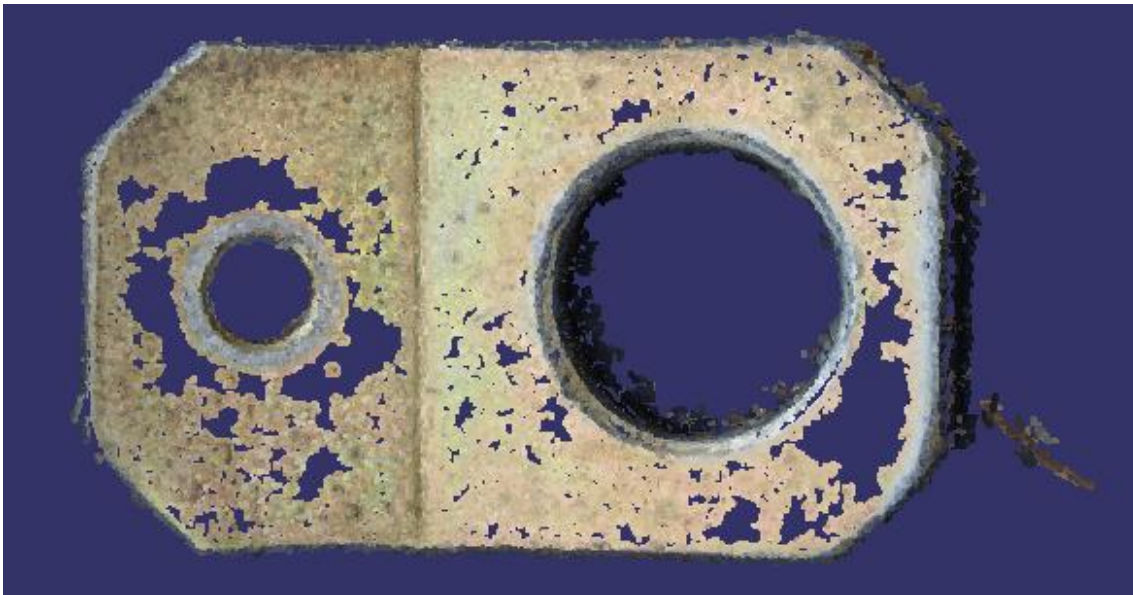


Figura 4.22 - Regard3D: Resultado da Densificação

A última etapa, a geração de superfície, é executada pelo comando *Create Surface...* localizado também no menu esquerdo. Esta etapa consiste na criação de uma malha triangular que torna uma superfície fechada, tentando ser o mais fiel possível à nuvem de pontos obtida na etapa de densificação. É apresentada a janela da Figura 4.23, tendo dois métodos seleccionáveis, *Poisson Surface Reconstruction* e *Floating Scale Surface Reconstruction*. Se a etapa anterior for realizada através do método *CMVS/PMVS* apenas a opção *Poisson Surface Reconstruction* pode ser utilizada, no caso de ter sido usado o método *MVE* é recomendado pelo autor do software a escolha do *Floating Scale Surface Reconstruction*.

Os parâmetros do *Poisson Surface Reconstruction* que podem ser alterados são: *Depth*, que corresponde à solução de um valor numa grelha no espaço tridimensional (voxel) com uma resolução não superior a *depth*⁸; *Samples Per Node*, onde a construção da superfície é adaptada à densidade da amostragem de pontos, sendo o número mínimo de amostras limitado pelo valor definido, e quanto mais ruído tiver a nuvem de pontos maior terá de ser o seu valor; *Point Weight*, valor que especifica a importância da interpolação dos pontos de amostragem; e por último *Trim Threshold* que determina o excesso de superfície criada. Para o método *Floating Scale Surface Reconstruction* os quatros parâmetros a definir são: *Levels* que definem o nível de detalhe da malha; *Scale Factor Multiplier* que correlaciona a extrapolação e a interpolação de pontos; *Confidence Threshold* que permite limitar os contornos da geometria; e por fim *Min. Component Size* que indica o número mínimo de vértices que um componente tem de ter para não ser removido.

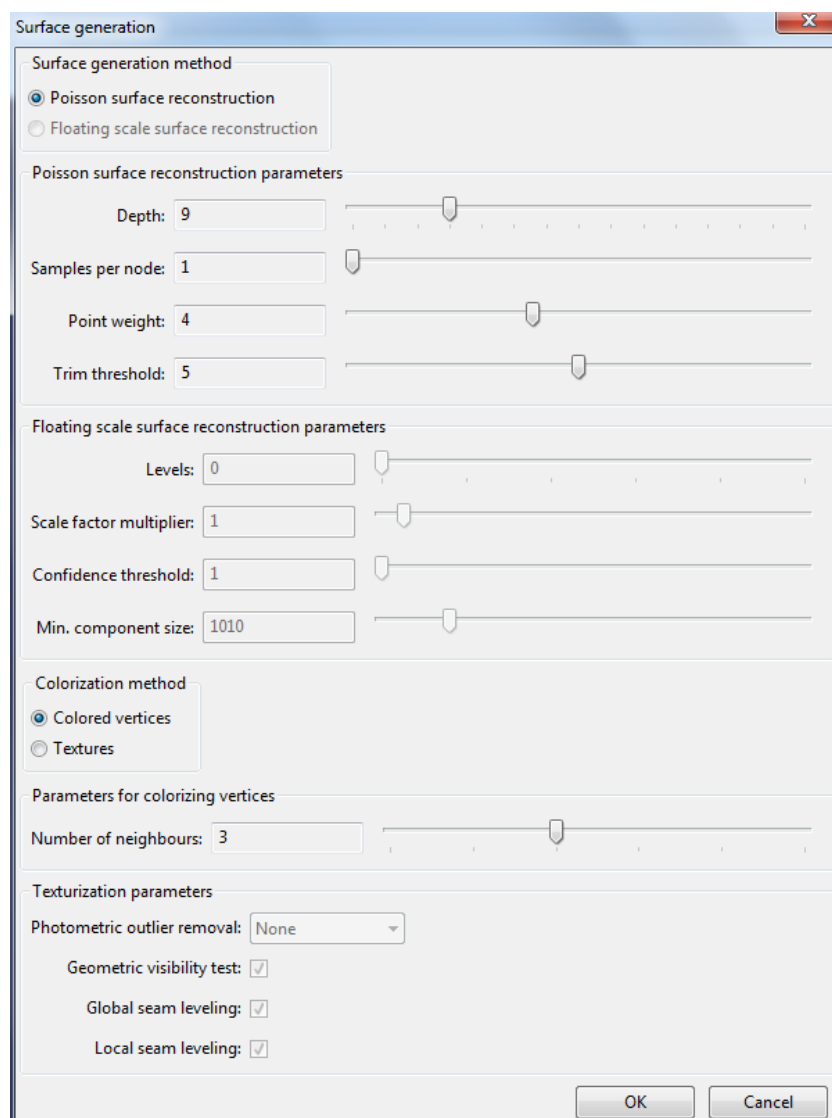


Figura 4.23 – Regard3D: Parâmetros de Geração de Superfície

Ainda nesta mesma janela, pode-se seleccionar como método de colorização *Colored Vertices* com uma cor a ser atribuída a cada aresta ou *Textures* que cria texturas na malha dando um maior detalhe em termos de cor. O processo de criar texturas envolve um consumo de memória muito superior em relação à opção de arestas coloridas, e tem quatro parâmetros seleccionáveis: *Photometric Outlier Removal* que quando activo remove objectos não estáticos que aparecem apenas em algumas fotografias; *Geometric Visibility Test* que quando ligado remove partes da superfície que não são visíveis em nenhuma das fotografias; *Global Seam Leveling* e *Local Seam Leveling* melhoram a qualidade das texturas minimizando transições severas.

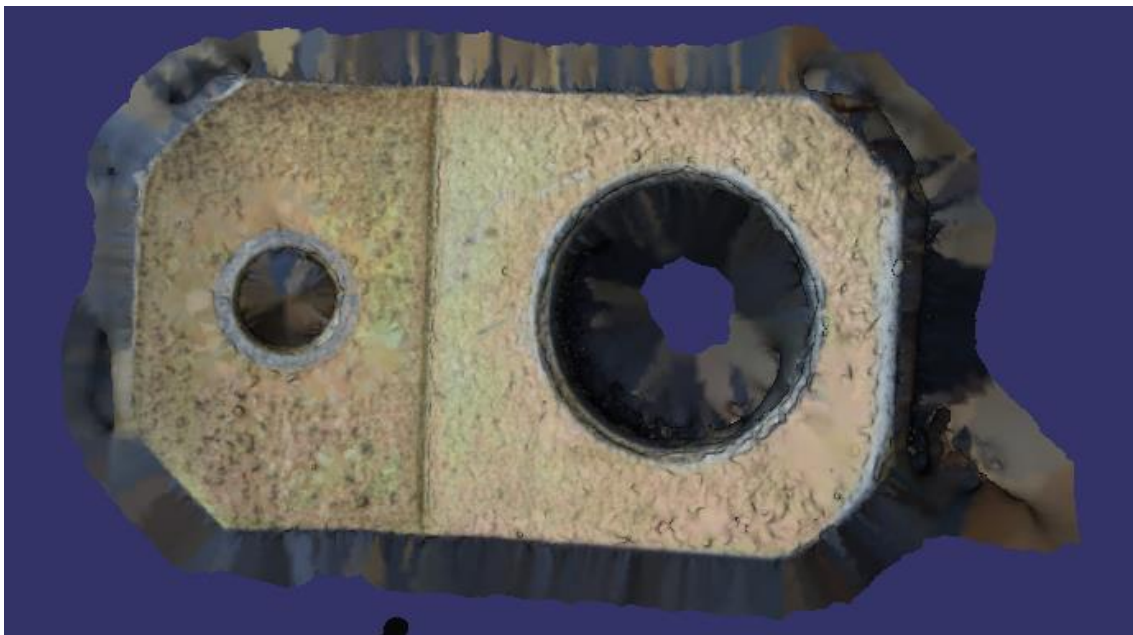


Figura 4.24 – Regard3D: Resultado da Superfície Final

A malha da Figura 4.24 resultado processo de geração de superfície aplicado à nuvem de pontos densificada da Figura 4.23. Como é facilmente perceptível, todo o contorno envolvente do objecto está coligado a zonas que são ruído, bem como os seus dois furos que estão também quase “preenchidos”, apesar destas zonas estarem “limpas” na nuvem de pontos densificada. Também é visível que os pontos ruído posicionados no canto inferior direito contribuíram muito significativamente para uma zona da malha de maior área de ruído, e demonstra bem a importância da ausência de pontos não pertencentes à superfície que a nuvem de pontos usada para criar a malha deve possuir. No menu esquerdo é possível exportar a malha apenas nos formatos *Stanford Polygon File (*.ply)* e *Alias Wavefront Object (*.obj)*.

5. Trabalho Experimental


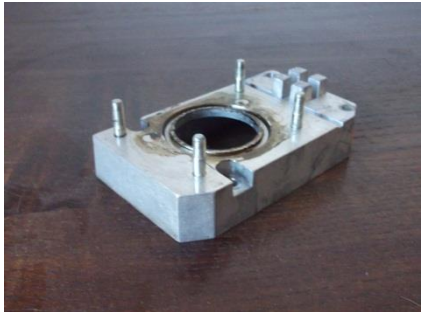


5.1. Introdução

Usando uma máquina fotográfica digital, e recorrendo apenas à luz natural e a fundos e bases feitos de cartolina ou plástico de cor azul, preta ou magenta, as fotografias foram tiradas de três formas: com a peça alvo imóvel e a câmara movendo-se à volta; com a peça colocada numa superfície giratória e a câmara em posição fixa; e com a peça imóvel e a câmara movendo-se livremente, capturando várias secções da superfície da peça e usando diferentes distâncias focais. Os vários testes contidos neste capítulo têm como intuito comparar modelos com diferentes valores dos parâmetros de selecção, através da medição de cotas de referência, de forma a ser possível encontrar as definições que melhor se aplicam na obtenção de um modelo final mais semelhante possível à peça real.

5.2. Peças

Para este estudo foram seleccionadas quatro peças diferentes. As peças apresentam superfícies com diferentes formas, com superfícies planas, superfícies côncavas, superfícies com furos de várias dimensões, superfícies simples e superfícies com mais pormenores. Todas as peças apresentam superfícies de vários padrões, sendo umas mais espelhadas quando sob radiação luminosa, e outras superfícies quase homogêneas em relação à sua cor. A designação de cada peça encontra-se indicada na Tabela 5.1, e os respectivos desenhos técnicos cotados em anexo, e obtidos através da medição de cotas com um paquímetro e com o recurso à ferramenta de inserção de fotografias do *SolidWorks*.

Tabela 5.1 - Designação das Peças Seleccionadas

<i>Peça</i>	<i>Designação</i>
	<i>Peça A</i>
	<i>Peça B</i>
	<i>Peça C</i>
	<i>Peça D</i>

5.3. Resultados Obtidos Pelo *Agisoft PhotoScan*

Como descrito no Capítulo 4, existem vários parâmetros de selecção na fase *Alinhamento*. No entanto, para a mesma peça e usando exactamente as mesmas fotos, com as mesmas máscaras de imagem e os mesmos parâmetros, os resultados são diferentes. Os resultados obtidos para os ensaios com a Peça A, com três limites de pontos-chave – 40 000, 100 000 e o máximo – e dois limites de pontos-nó – 1000 e 4000 – são apresentados para cada configuração, de forma resumida, nas tabelas em anexo.

Para os três valores acima referidos de limites de pontos-chave, foram utilizados os dois limites de pontos-nó, e realizando cinco ensaios para cada combinação, os resultados das tabelas em anexo foram obtidos após 150 ensaios de correspondências efectuados. Ao contrário das correspondências efectuadas pelo *Regard3D*, que fazendo cinco ensaios para a mesma peça com os parâmetros inalterados o resultado é, sempre, exactamente o mesmo número de pontos, na situação do *PhotoScan* o resultado é diferente. Em alguns casos, principalmente com as definições de precisão mais baixas, nem todos os ensaios tiveram como resultado uma nuvem de pontos que representasse a figura a toda a sua volta, ou seja, a 360°.

Os modelos obtidos são geralmente definidos com as configurações por defeito, excepto quando referido o contrário. No primeiro teste é explicado todo o procedimento experimental que foi aplicado também aos testes posteriores.

5.3.1. *PhotoScan* Teste 1 – Variação do Número de Pontos-chave

O primeiro teste tem como objectivo comparar as diferenças de um modelo final obtido por diferentes números de pontos-chave. Assim, mantendo inalterados os restantes parâmetros, desde os pontos-nó às definições avançadas para as três diferentes fases, de *Alinhamento*, de *Construção de Nuvem Densa* e de *Construção de Modelo*, é feita a medição das cotas representadas na Figura 5.1 para a Peça A.

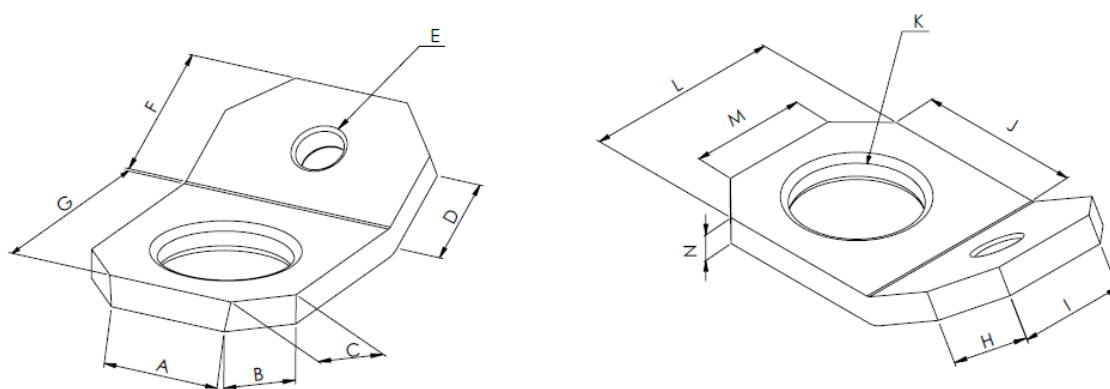


Figura 5.1 - Identificação das Dimensões a Medir na Peça A

Pelas tabelas dos resultados das correspondências (em anexo), pode-se desde já verificar que apenas as precisões *Muito Elevada*, *Elevada* e *Média* têm taxas de sucesso de 100%. Deste modo escolheu-se a precisão *Média* pois das três precisões é aquela que exige menos tempo de computação para qualquer variável de pontos-chave e pontos-nó para a fase de *Alinhamento* (Tabela 0.8). Manteve-se seleccionado na fase de *Alinhamento* a precisão *Média*, a pré-selecção de pares desactivada, a opção de restringir características considerando as máscaras activa, e um limite de pontos-nó de 4000. Para a fase de *Construção de Nuvem Densa* foi seleccionado uma qualidade *Média* e uma filtragem de profundidade *Agressiva*. Por fim, na fase de *Construção de Modelo* foi seleccionado um tipo de superfície *Arbitrário*, a fonte de dados a *Nuvem Densa*, uma contagem de faces de *Média* (60 000), a interpolação *Desactivada* e todas as classes de pontos seleccionadas. Após a obtenção do modelo, foi usado o *Autodesk Meshmixer* para reparar a malha, e as medições e a aplicação do factor de escala realizadas utilizando o *Autodesk Netfabb*. Posteriormente, é possível transferir o ficheiro para o *SolidWorks* em formato .stl para assim o software reconhecer o modelo como um sólido. A visão geral do procedimento deste teste encontra-se ilustrada na Figura 5.2.

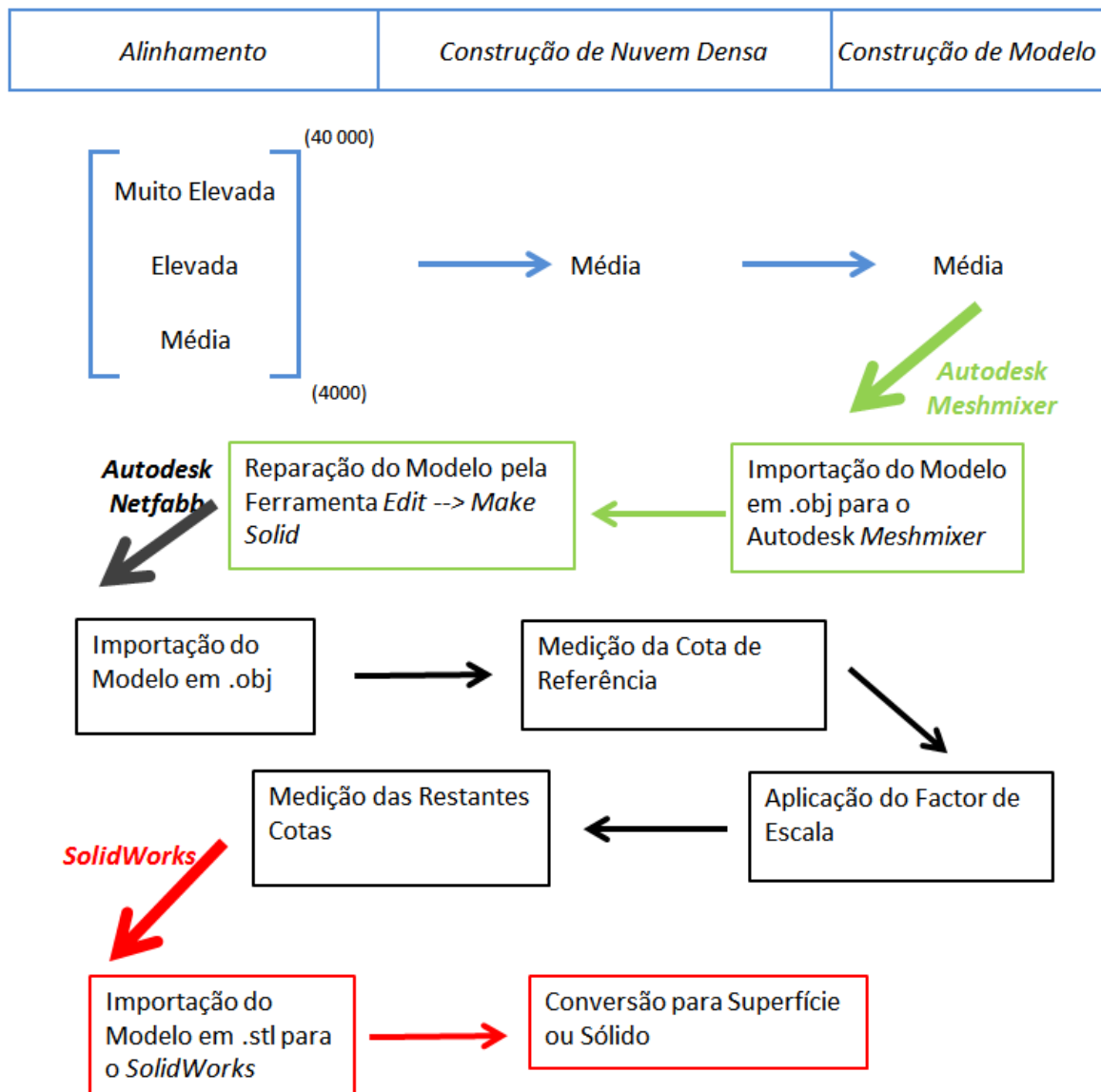


Figura 5.2 – PhotoScan: Visão Geral do Procedimento do Teste 1

A escolha do *Autodesk Meshmixer* face aos restantes softwares de tratamento de malhas, deve-se ao facto da ferramenta de reparação ser bastante rápida e de apresentar excelentes resultados no modelo final, inclusive se importado o ficheiro .obj para o *SolidWorks*, o mesmo não apresentará nenhum erro, o que nem sempre sucede utilizando a própria ferramenta de reparação do *SolidWorks*. O *Autodesk Netfabb* além de permitir uma fácil selecção dos pontos de medição, o que não acontece com o *AutoDesk Meshmixer* e com o *MeshLab*, exige muito menos capacidade de processamento do que a ferramenta de medição do *SolidWorks*, porque devido ao modelo conter várias faces, só o processo de rotação e translação do modelo em si pode-se revelar bastante lento.

Além de que é impossível executar qualquer medição se o modelo não for transformado em superfície ou sólido pelas ferramentas do *SolidWorks*, e que mais uma vez se torna um processo bastante demorado (superior a uma hora num equipamento dito normal/médio) ou mesmo irrealizável, tal como a aplicação do factor de escala que é de novo um processo exigente. De realçar que para modelos com menos faces, e que exijam menos tratamento de reparação, o *SolidWorks* é viável, mas visto o grande número de modelos utilizados com uma quantidade muito considerável de faces, o recurso à combinação de vários *softwares* permite que todo o procedimento seja mais breve, de mais fácil utilização das diferentes ferramentas e da obtenção dos resultados com menor grau de incerteza.

Como cota de referência, foi seleccionada a cota designada por *N* na Figura 5.1, por ser a cota de menor valor, o que significa que os dois pontos medidos se encontram mais próximos que os pertencentes às restantes cotas. Apesar de a medição ser executada pela ferramenta do *Autodesk Netfabb*, é necessário que o utilizador seleccione os dois pontos necessários, tal como ocorre com as ferramentas dos outros *softwares*, o que implica que o erro humano também se encontra presente nos resultados das medições. Como a distância entre os dois pontos é menor, é mais fácil executar comandos de rotação e translação da peça de forma a conferir que os dois pontos pertencem a um segmento de recta perpendicular às arestas a que se encontram, se não for necessário fazer *zoom in/out* para os dois pontos estarem contidos no campo de visão (Figura 5.3).

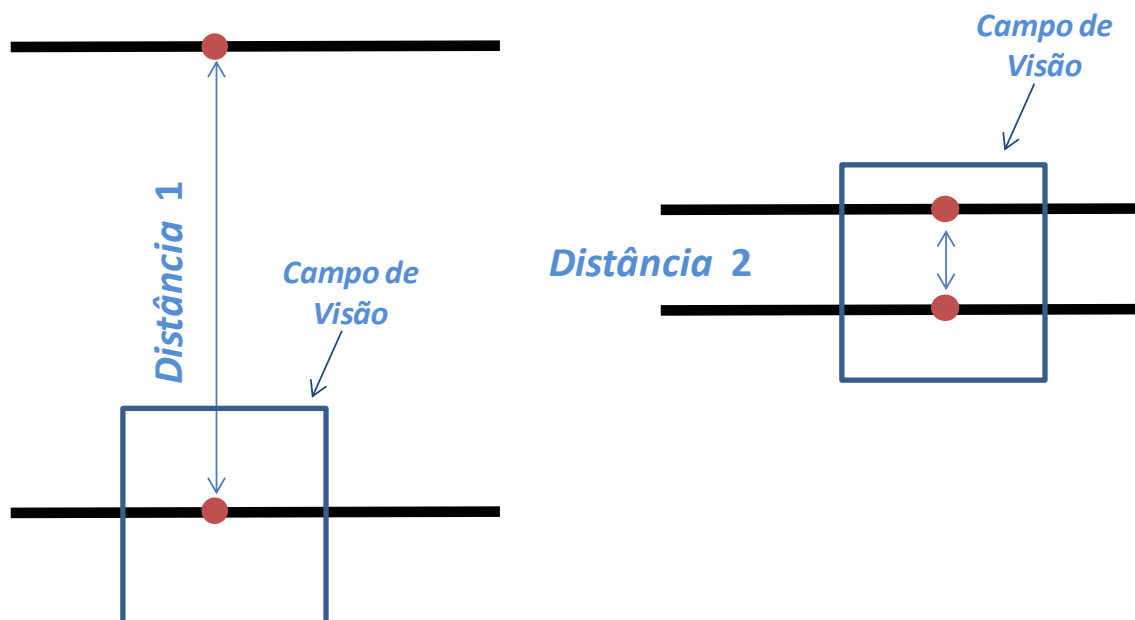


Figura 5.3 – Dois Pontos Contidos num Campo de Visão

A Tabela 5.2 indica os valores medidos da cota *N* para cada modelo, e a média desses mesmos valores. É através da relação entre os valores das cotas dos modelos com o valor da cota da peça real que se encontra o valor do factor de escala, que é aplicado em cada modelo. Foram realizadas 10 medições da cota *N* para cada modelo (Figura 5.4), sendo a média das medições o valor usado na relação do factor de escala.

Tabela 5.2 – PhotoScan Teste 1: Valores Medidos da Cota N

<i>Precisão do Modelo</i>	<i>Valores das Medições da Cota N [mm]</i>										<i>Média [mm]</i>
Média (40 000/4000)	0.60	0.63	0.62	0.60	0.63	0.61	0.63	0.61	0.62	0.63	0.62
Média (100 000/4000)	0.53	0.54	0.53	0.52	0.52	0.54	0.53	0.55	0.54	0.53	0.53
Média (Máx/4000)	0.87	0.88	0.86	0.85	0.88	0.87	0.88	0.86	0.89	0.88	0.87

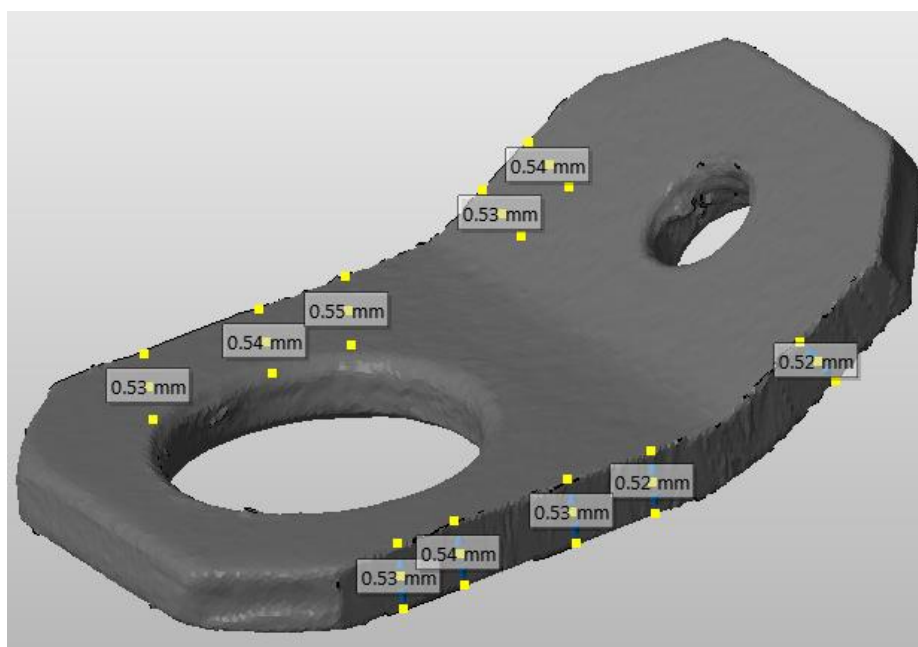


Figura 5.4 - Dez Medições da Cota N num Modelo

Com as medidas médias, e usando o valor real da cota, o valor do factor de escala para cada modelo foi calculado, e obtiveram-se os valores indicados abaixo.

Tabela 5.3 - PhotoScan Teste 1: Valores do Factor de Escala

<i>Precisão do Modelo</i>	<i>Relação do Valor da Cota N do Modelo com o Valor Real</i>	<i>Valor do Factor de Escala</i>
Média (40 000/4000)	8.11 / 0.62	13.08
Média (100 000/4000)	8.11 / 0.53	15.30
Média (Máximo/4000)	8.11 / 0.87	9.32

Através da ferramenta *Scale* do *Autodesk Netfabb* foi aplicado o respectivo factor de escala para cada modelo. Como foi seleccionada a opção de fixar o rácio de escala, o software considera que o aumento de escala é uniforme, e assim basta indicar o valor do factor de escala para uma coordenada – X, Y ou Z – que de forma automática o mesmo valor será aplicado às restantes. Recorreu-se à ferramenta *Analysis* para obter os valores do volume e área dos modelos (Tabela 5.4), antes e após a aplicação do factor de escala, para verificar se as dimensões foram de facto afectadas pelo factor de escala aplicado, e se resultaram em modelos com dimensões semelhantes. Como se verificou que os valores referidos são semelhantes, foi realizada a medição dos três modelos com a ferramenta *Measurement*, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.5, Tabela 5.6 e Tabela 5.7, respectivamente para os modelos com 40 000, 100 000 e Máximo número de pontos-chave.

Tabela 5.4 – PhotoScan Teste 1: Volume e Área dos Modelos Após Aplicação do Factor de Escala

<i>Modelo</i>	<i>Volume [cm³]</i>	<i>Área [cm²]</i>
Média (40 000/4000)	40.1576	132.0325
Média (100 000/4000)	41.3310	134.6153
Média (Máximo/4000)	40.4006	132.5390
Peça A (SolidWorks)	38.6590	130.0475

Tabela 5.5 – PhotoScan Teste 1: Medições das Cotas do Modelo 40 000/4000

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência¹ [mm]</i>
A	33.06	33.15	33.50	33.24	33.11
B	19.02	18.92	18.89	18.94	19.26
C	18.20	17.97	17.97	18.05	17.49
D	24.76	24.51	24.32	24.53	24.21
E	13.17	13.39	13.56	13.37	12.93
F	38.08	37.67	38.44	38.06	38.72
G	62.73	62.67	61.57	62.32	61.93
H	19.70	20.12	19.58	19.8	19.90
I	32.55	32.55	32.80	32.63	32.80
J	50.13	50.00	50.19	50.11	49.43
K	36.00	36.31	36.56	36.29	35.30
L	60.15	60.66	60.32	60.38	60.05
M	36.18	35.46	36.04	35.89	35.59
N	8.11	8.10	8.13	8.11	8.11

¹ Valores obtidos por medição com paquímetro (com resolução de +/-0.01 mm)

Tabela 5.6 – PhotoScan Teste 1: Medições das Cotas do Modelo 100 000/4000

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	32.27	32.51	33.11	32.36	33.11
B	18.70	18.51	19.26	18.65	19.26
C	17.38	17.40	17.49	17.45	17.49
D	24.56	24.91	24.21	24.68	24.21
E	13.05	12.83	12.93	13.01	12.93
F	38.08	38.44	38.72	38.43	38.72
G	63.35	63.28	61.93	63.25	61.93
H	19.73	20.37	19.90	19.93	19.90
I	32.68	32.71	32.80	32.76	32.80
J	50.14	50.26	49.43	50.15	49.43
K	36.29	37.29	35.30	36.77	35.30
L	60.93	60.98	60.05	60.98	60.05
M	36.26	36.52	35.59	36.52	35.59
N	8.11	8.11	8.11	8.10	8.11

Tabela 5.7 – PhotoScan Teste 1: Medições das Cotas do Modelo Máximo/4000

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	32.64	32.59	32.36	32.53	33.11
B	19.23	19.27	19.22	19.24	19.26
C	17.29	17.19	17.28	17.25	17.49
D	24.62	24.23	24.80	24.55	24.21
E	13.00	12.86	13.01	12.96	12.93
F	38.24	37.79	38.48	38.17	38.72
G	62.23	61.14	62.07	61.81	61.93
H	19.28	19.14	19.21	19.21	19.90
I	32.68	32.36	32.65	32.56	32.80
J	50.48	50.30	50.65	50.48	49.43
K	36.35	35.88	36.40	36.21	35.30
L	59.06	59.63	59.33	59.34	60.05
M	36.52	36.38	35.98	36.29	35.59
N	8.10	8.13	8.13	8.12	8.11

5.3.2. *PhotoScan* Teste 2 – Variação do Número de Pontos-nó

O teste seguinte tem como objectivo analisar dois modelos obtidos com os mesmos pontos-chave mas variando o número de pontos-nó, mantendo também inalterados os parâmetros nas fases seguintes para os dois modelos. O procedimento utilizado no teste anterior é o mesmo aplicado ao teste actual, com apenas uma alteração de parâmetros na fase de *Alinhamento*.

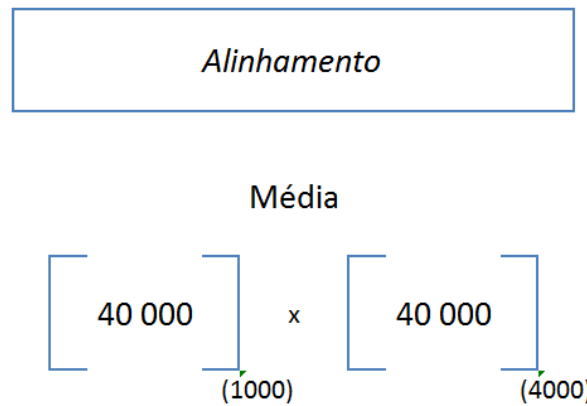


Figura 5.5 - PhotoScan: Teste 2

Visto que os resultados do modelo com 4000 pontos-nó já foram obtidos no teste anterior, basta apenas realizar o procedimento para o modelo com 1000 pontos-nó. Usando novamente as cotas indicadas na Figura 5.1, e recorrendo à cota *N* como referência, os valores das medições necessárias para encontrar o valor do factor de escala a aplicar no modelo com 1000 pontos-nó e o próprio factor de escala calculado encontram-se, respectivamente, na Tabela 5.8 e na Tabela 5.9.

Tabela 5.8 - PhotoScan Teste 2: Valores Medidos da Cota *N*

Precisão do Modelo	Valores das Medições da Cota <i>N</i> [mm]										Média [mm]
Média (40 000/1000)	0.65	0.66	0.67	0.66	0.65	0.67	0.67	0.67	0.66	0.65	0.66

Tabela 5.9 - PhotoScan Teste 2: Valor do Factor de Escala

Precisão do Modelo	Relação do Valor da Cota <i>N</i> do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
Média (Máximo/4000)	8.11 / 0.66	12.29

Confirmou-se a aplicação do factor de escala adequado pelas dimensões do volume e da área dos dois modelos, que se encontram perto dos mesmos valores, como pode ser constatado pela tabela abaixo apresentada, sendo que os valores são superiores no modelo com menor número de pontos-nó.

Tabela 5.10 – PhotoScan Teste 2: Volume e Área dos Modelos Após Aplicação do Factor de Escala

Modelo	Volume [cm ³]	Área [cm ²]
Média (40 000/1000)	44.0586	139.1861
Média (40 000/4000)	40.1576	132.0325
Peça A (SolidWorks)	38.6590	130.0475

Os resultados das medições do modelo com 40 000 pontos-chave e 1000 pontos-nó foram registrados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – PhotoScan Teste 2: Medições das Cotas do Modelo 40 000/1000

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	32.89	32.92	33.11	33.00	33.11
B	19.07	19.69	19.26	19.43	19.26
C	17.39	17.50	17.49	17.42	17.49
D	24.72	24.55	24.21	24.73	24.21
E	13.38	13.33	12.93	13.32	12.93
F	38.85	38.39	38.72	38.28	38.72
G	63.15	62.70	61.93	62.98	61.93
H	20.15	20.11	19.90	20.01	19.90
I	32.71	33.20	32.80	32.90	32.80
J	50.84	51.10	49.43	50.96	49.43
K	36.85	36.42	35.30	36.63	35.30
L	61.76	61.66	60.05	61.73	60.05
M	36.61	36.43	35.59	36.59	35.59
N	8.10	8.07	8.11	8.10	8.11

5.3.3. *PhotoScan* Teste 3 – Variação da Precisão do Alinhamento

O terceiro teste tem o intuito de comparar três modelos com precisões diferentes, mantendo os restantes parâmetros fixos. Mais uma vez o procedimento adoptado é idêntico aos dos outros dois testes anteriores. O modelo com a configuração *Média* já foi medido no Teste 1 (Tabela 5.5), faltando apenas registrar as medições das cotas dos modelos com as precisões *Elevada* e *Muito Elevada*.

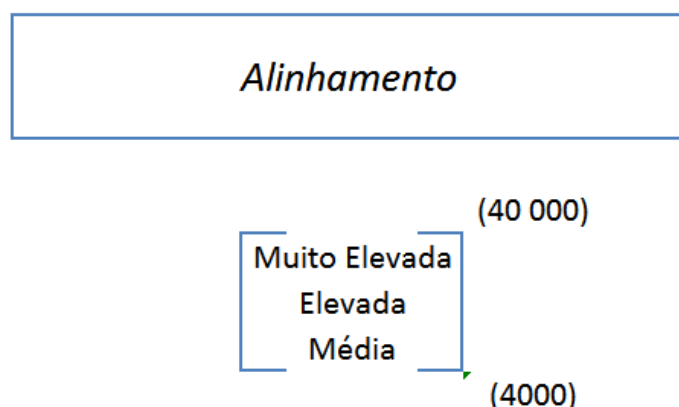


Figura 5.6 – PhotoScan: Teste 3

A Tabela 5.12 contém os valores medidos da cota de referência em ambos os modelos, onde se pode perceber desde logo que quanto maior for a precisão do *Alinhamento* menor serão as dimensões dos modelos finais. No primeiro teste verificou-se que o modelo com precisão *Média* possuía uma cota de referência com o seu valor médio de 0.62 mm, e abaixo observa-se que quanto aumentando a precisão os valores dessa mesma cota diminuem para 0.34 mm e 0.21 mm. Ou seja, quanto mais preciso o alinhamento seleccionado, maior será o valor de escala a aplicar.

Tabela 5.12 – PhotoScan Teste 3: Valores Medidos da Cota N

<i>Precisão do Modelo</i>	<i>Valores das Medições da Cota N [mm]</i>										<i>Média [mm]</i>
Elevada	0.34	0.35	0.34	0.33	0.33	0.35	0.35	0.34	0.34	0.35	0.34
Muito Elevada	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.21

Como tal, tendo os modelos diferentes dimensões é necessário aplicar diferentes factores de escala (Tabela 5.13). Como verificado no primeiro teste, especificamente nos dados presentes na Tabela 5.4, os modelos com a configuração de 4000 pontos-nó têm áreas e volumes semelhantes após aplicar o factor de escala, como também sucedeu aos modelos deste teste, com valores muito próximos (Tabela 5.14).

Tabela 5.13 – PhotoScan Teste 3: Valores do Factor de Escala

<i>Precisão do Modelo</i>	<i>Relação do Valor da Cota N do Modelo com o Valor Real</i>	<i>Valor do Factor de Escala</i>
Elevada (40 000/4000)	8.11 / 0.34	23.85
Muito Elevada (40 000/4000)	8.11 / 0.21	38.62

Tabela 5.14 – PhotoScan Teste 3: Volume e Área dos Modelos Após Aplicação do Factor de Escala

<i>Modelo</i>	<i>Volume [cm³]</i>	<i>Área [cm²]</i>
Elevada (40 000/4000)	41.3131	133.7936
Muito Elevada (40 000/4000)	40.8119	132.6334
Peça A (SolidWorks)	38.6590	130.0475

Na seguinte página encontram-se registados os valores das três medições e média de cada cota para os modelos com a configuração *Elevada* e *Muito Elevada* de precisão de *Alinhamento*, respectivamente a Tabela 5.15 e a Tabela 5.16.

Tabela 5.15 – PhotoScan Teste 3: Medições das Cotas do Modelo Com Precisão Elevada

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	32.94	32.27	33.11	32.64	33.11
B	19.32	19.54	19.26	19.43	19.26
C	17.63	17.47	17.49	17.59	17.49
D	24.42	24.08	24.21	24.32	24.21
E	13.07	13.30	12.93	13.19	12.93
F	38.56	38.76	38.72	38.63	38.72
G	62.07	62.10	61.93	62.03	61.93
H	19.32	19.12	19.90	19.28	19.90
I	32.64	32.61	32.80	32.53	32.80
J	49.76	50.19	49.43	49.91	49.43
K	36.07	36.29	35.30	36.18	35.30
L	60.97	61.08	60.05	60.98	60.05
M	36.35	36.16	35.59	36.42	35.59
N	8.10	8.14	8.11	8.12	8.11

Tabela 5.16 – PhotoScan Teste 3: Medições das Cotas do Modelo Com Precisão Muito Elevada

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	32.90	32.76	32.83	32.83	33.11
B	19.21	19.15	19.08	19.15	19.26
C	17.63	17.58	17.86	17.69	17.49
D	24.64	24.76	24.58	24.66	24.21
E	13.20	13.14	13.05	13.13	12.93
F	38.78	38.77	38.56	38.70	38.72
G	61.98	61.74	61.84	61.85	61.93
H	19.69	19.82	19.95	19.82	19.90
I	32.83	32.56	32.69	32.69	32.80
J	49.20	49.42	49.80	49.47	49.43
K	35.86	36.00	35.92	35.93	35.30
L	60.72	60.90	60.72	60.78	60.05
M	36.02	35.87	35.86	35.92	35.59
N	8.09	8.14	8.12	8.12	8.11

5.3.4. PhotoScan Teste 4 – Variação da Precisão da Construção da Nuvem Densa

A densificação da nuvem de pontos obtida pela fase anterior não é obrigatória para o programa conseguir originar uma malha. No entanto, é aconselhado a execução desta etapa pois proporciona um modelo mais similar à peça real – haverá menos espaço entre pontos, i.e., mais informação na nuvem de pontos que irá permitir uma malha com menos incerteza – e também a opção de importar a nuvem de pontos para um outro software. Neste teste comparam-se as diferenças em termos de valores de cotas que possam existir em modelos com configurações diferentes.

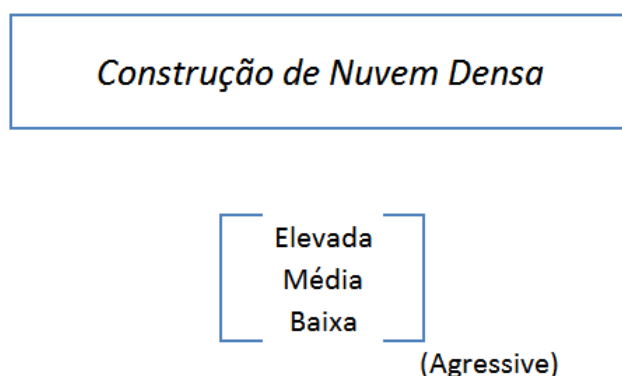


Figura 5.7 – PhotoScan: Teste 4

Os modelos têm os parâmetros de *Alinhamento* totalmente iguais bem como os de *Construção de Modelo*, com a configuração 40 000/1000 inicial e precisão média em todas as restantes fases. Mais uma vez, não existe a necessidade de realizar as medições para um modelo, com a precisão *Média*, porque as mesmas já foram registadas anteriormente na Tabela 5.11. Para os outros dois modelos, as cotas de referência foram medidas e são apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 5.17 – PhotoScan Teste 4: Valores Medidos da Cota N

Precisão do Modelo	Valores das Medições da Cota N [mm]										Média [mm]
Baixa	0.66	0.66	0.66	0.68	0.66	0.64	0.68	0.66	0.67	0.66	0.66
Elevada	0.65	0.63	0.66	0.66	0.66	0.67	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66

Tal como o modelo com precisão *Média*, a cota de referência tem 0.66 mm, o que implica que os factores de escala a usar são exactamente os mesmos.

Tabela 5.18 – PhotoScan Teste 4: Valores do Factor de Escala

Precisão do Modelo	Relação do Valor da Cota N do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
Baixa	8.11 / 0.66	12.29
Elevada	8.11 / 0.66	12.29

Os valores do volume e área dos modelos não são iguais como demonstrado na Tabela 5.19. Em relação ao modelo com configuração *Média* existe um decréscimo de 3.64% no volume e de 2.59% na área para o modelo com a configuração inferior, e de 0.29% no volume e de 0.92% para o modelo com configuração superior. Face a estes valores pode-se assumir que a fase de densificação da nuvem influencia o modelo final a nível de dimensões.

Tabela 5.19 – PhotoScan Teste 4: Volume e Área dos Modelos Após Aplicação do Factor de Escala

Modelo	Volume [cm ³]	Área [cm ²]
Baixa	42.4539	135.5765
Média	44.0586	139.1861
Elevada	43.9289	137.9036
Peça A (SolidWorks)	38.6590	130.0475

Nas duas tabelas que se seguem estão registados os dados das medições para os modelos com precisão *Baixa* e *Elevada* de densificação da nuvem.

Tabela 5.20 – PhotoScan Teste 4: Medições das Cotas do Modelo Com Precisão de Densificação Baixa

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	32.61	33.08	32.40	32.70	33.11
B	18.94	19.41	19.66	19.34	19.26
C	17.51	17.85	17.72	17.69	17.49
D	25.09	25.97	25.62	25.56	24.21
E	13.31	13.30	13.64	13.42	12.93
F	37.70	37.75	37.38	37.61	38.72
G	62.30	62.03	62.08	62.14	61.93
H	19.75	20.11	19.60	19.82	19.90
I	33.04	32.75	32.66	32.82	32.80
J	48.99	48.42	48.33	48.58	49.43
K	37.04	36.89	36.94	36.96	35.30
L	61.61	61.31	61.00	61.31	60.05
M	37.83	37.61	37.43	37.62	35.59
N	8.10	8.14	8.09	8.11	8.11

Tabela 5.21 – PhotoScan Teste 4: Medições das Cotas do Modelo Com Precisão de Densificação Elevada

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	33.22	32.31	33.01	32.85	33.11
B	20.04	20.50	20.77	20.44	19.26
C	17.47	17.71	17.92	17.70	17.49
D	23.78	23.67	23.86	23.77	24.21
E	13.10	13.08	13.19	13.12	12.93
F	38.06	38.04	37.92	38.01	38.72
G	62.58	62.20	62.70	62.49	61.93
H	20.17	20.10	20.08	20.12	19.90
I	32.97	32.71	32.73	32.80	32.80
J	49.17	48.94	49.05	49.05	49.43
K	36.56	36.61	36.49	36.55	35.30
L	62.04	62.18	62.58	62.27	60.05
M	36.14	35.91	36.31	36.12	35.59
N	8.08	8.17	8.10	8.12	8.11

5.3.5. PhotoScan Teste 5 – Variação da Filtragem de Profundidade

O último dos testes tem como objectivo comparar as consequências no modelo final se o parâmetro de *Filtragem de Profundidade* for modificado. Os dois modelos utilizados têm todos os outros parâmetros seleccionáveis com as mesmas configurações, e aproveitando o modelo já registado na Tabela 5.11 que tem a configuração *Agressiva*, basta apenas medir as cotas de um outro modelo com uma diferente configuração. Escolheu-se um modelo com a configuração *Mild* pois aumenta a importância dos pequenos detalhes da peça real. As medições da cota de referência são apresentadas na Tabela 5.22.

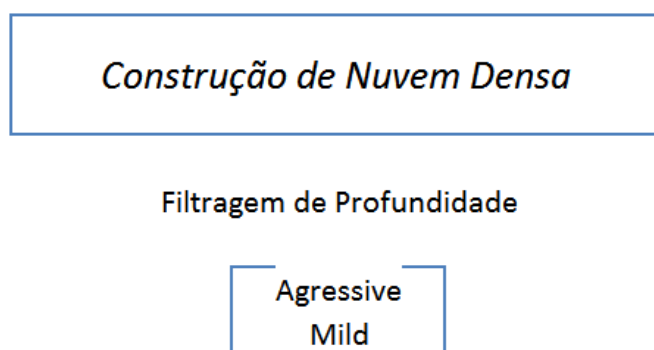


Figura 5.8 – PhotoScan: Teste 5

Tabela 5.22 - PhotoScan Teste 5: Valores Medidos da Cota N

Precisão do Modelo	Valores das Medições da Cota N [mm]										Média [mm]
Mild	0.68	0.66	0.67	0.66	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65	0.66	0.66

Tal como no teste anterior, em que os valores das cotas de referência eram 0.66 mm, o modelo deste teste partilha o mesmo valor. Desta forma, o valor do factor de escala a aplicar será também o mesmo.

Tabela 5.23 – PhotoScan Teste 5: Valor do Factor de Escala

Precisão do Modelo	Relação do Valor da Cota N do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
Média (Máximo/4000)	8.11 / 0.66	12.29

Os dois modelos, após a aplicação do factor de escala, possuem valores de volumes e áreas parecidos, à semelhança do que foi verificado nos testes anteriores.

Tabela 5.24 – PhotoScan Teste 5: Volume e Área dos Modelos Após Aplicação do Factor de Escala

Modelo	Volume [cm ³]	Área [cm ²]
Mild	42.7784	136.5129
Agressivo	44.0586	139.1861
Peça A (SolidWorks)	38.6590	130.0475

Os valores das cotas medidas e a sua média para o modelo com a configuração *Mild* de *Filtragem de Profundidade* estão registados na tabela seguinte.

Tabela 5.25 – PhotoScan Teste 5: Medições das Cotas do Modelo Com Precisão Densificação Mild

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	32.55	31.99	32.07	32.20	33.11
B	19.20	19.66	19.50	19.45	19.26
C	17.33	17.88	17.35	17.52	17.49
D	23.82	23.45	23.58	23.62	24.21
E	13.36	13.17	13.33	13.29	12.93
F	38.06	38.36	38.67	38.36	38.72
G	63.15	63.45	62.98	63.19	61.93
H	19.33	19.45	19.41	19.40	19.90
I	32.70	32.77	32.39	32.62	32.80
J	49.93	49.86	50.07	49.95	49.43
K	37.03	36.68	36.92	36.88	35.30
L	61.41	61.48	61.61	61.50	60.05
M	36.35	36.09	36.81	36.42	35.59
N	8.11	8.15	8.12	8.13	8.11

5.4. Resultados Obtidos Pelo *Regard3D*

Como já mencionado anteriormente, todos os ensaios realizados pelo *Regard3D* apenas permitiram triangular as posições da câmara num ângulo aproximado de 180°. Assim, para executar os testes seguintes, seleccionou-se apenas as fotografias pertencentes ao mesmo conjunto utilizado para a Peça A no *PhotoScan* que continha a face 1 e 2, tal como indicado na Figura 5.9, o que resultou num total de 44 fotografias. As faces paralelas às indicadas não são reconstruídas nos modelos, resultando numa malha aberta, e por isso não preenchida. A decisão de utilizar só uma parte das fotografias deveu-se ao facto de mesmo utilizando as 60 fotografias, o modelo obtido era idêntico, mas o tempo de processamento da fase de *Correspondências* e de *Triangulação* era muito superior, e como tal não existem nenhuma vantagem em utilizar as restantes fotografias, e que acabariam por não acrescentar informação.

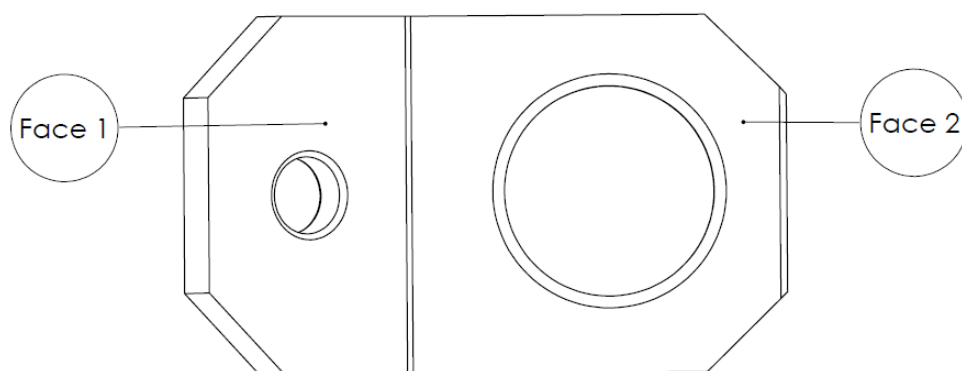


Figura 5.9 – Faces da Peça A nas Fotografias Utilizadas no *Regard3D*

Nos modelos obtidos pelo *Regard3D* grande parte da superfície gerada é ruído. Apesar de ser possível remover o mesmo, como explicado no capítulo anterior, as ferramentas de remoção necessitam que o utilizador seleccione as áreas da superfície que não têm valor. No entanto, em certos casos torna-se quase impossível distinguir se uma área é ruído ou se pertence à peça de interesse, como ilustrado na Figura 5.11, onde nem é possível diferenciar os contornos do furo mais pequeno da peça real. Deste modo, não é possível remover o ruído de forma adequada. Mesmo quando nos modelos com melhores resultados, como o apresentado na Figura 5.10, existe sempre ruído em algumas faces e arestas. Mais uma vez, se fosse removido o ruído, muitas faces quase que seriam removidas na sua totalidade. De notar também que modelos como o da Figura 5.11 em que se pode visualizar mais ou menos os contornos da peça, mas as faces estão longe de se aproximarem de superfícies lisas, parecendo que contêm grão.



Figura 5.10 – Ruído num Modelo Obtido pelo Regard3D

É possível observar pela imagem acima, que as dimensões que pertencem ao perímetro das faces 1 e 2, na sua maioria, são possíveis de medir, e que se distinguem bem mesmo quando a peça é quase homogénea, situação que ocorre quando o ficheiro é transferido para o *Autodesk Netfabb*. Mas em modelos como o ilustrado na Figura 5.11, onde nem todas as arestas e faces do modelo são diferenciáveis do ruído, não é possível usar as cotas do perímetro da superfície como referência. Assim, e recorrendo mais uma vez à Figura 5.1, a cota de referência a utilizar será a cota L , que é a cota visível e distinguível facilmente do ruído. No caso dos modelos em comparação em que algumas cotas não permitem uma medição correcta, apenas se comparam as cotas bem definidas entre os dois modelos. Como os modelos obtidos são abertos, pois só representam 180° da superfície da peça, fecha-los e tentar formar um sólido resultaria numa forma que se encontra longe da forma da peça real. Assim, não foi necessário exportar o modelo para o *Autodesk Meshmixer* ou outro software de reparação da malha.



Figura 5.11 – Ruído nos Contornos da Superfície do Modelo Obtido pelo Regard3D

5.4.1. Correspondências

Como descrito no procedimento de funcionamento do *Regard3D* anteriormente, a fase de *Correspondências* possui dois parâmetros alteráveis relacionados como os pontos-chave. Tratam-se da *Sensibilidade* e do *Rácio de Correspondência*, e os resultados dos pontos obtidos e do tempo de processamento para as várias opções encontram-se registados na Tabela 5.26. Como nem todos os modelos se encontram livre de ruído, existem cotas que se tornam difíceis de medir pois a selecção de dois pontos não é fácil, como já foi mencionado. Nos testes executados para os modelos obtidos pelo *PhotoScan* tinha-se determinado o factor de escala fazendo 10 medições de uma cota, pois tratava-se de um processo de relativa facilidade visto que o modelo estava praticamente livre de ruído. Como exemplificava a Figura 5.4, as medições foram feitas em vários locais para determinar o valor médio da cota de referência, seguido de 3 medições de todas as cotas após a aplicação do factor de escala. Para os modelos obtidos pelo *Regard3D*, como o ruído é bastante elevado, serão apenas realizadas 3 medições para determinar o factor de escala, seguido de apenas 3 medições das cotas que estejam livre o suficiente de ruído, e que permitam seleccionar dois pontos com a certeza de que pertencem à peça. O procedimento é exactamente o mesmo que o realizado para os modelos obtidos pelo *PhotoScan*, em relação à ordem de utilização dos softwares.

Tabela 5.26 – Peça A: Resultados das Correspondências pelo *Regard3D*

Pontos-chave		Pontos			Tempo [min]
Sensibilidade	Rácio de Correspondência	Média	Mínimo	Máximo	
0.001	0.6	4578	143	23308	2.82
	0.7	4578	143	23308	2.92
	0.8	4578	143	23308	3.14
	0.9	4578	143	23308	3.44
0.0007	0.6	7381	204	34873	3.39
	0.7	7381	204	34873	4.31
	0.8	7381	204	34873	4.30
	0.9	7381	204	34873	5.20
0.0005	0.6	10822	312	48255	4.95
	0.7	10822	312	48255	5.45
	0.8	10822	312	48255	6.01
	0.9	10822	312	48255	6.23
0.0001	0.6	37533	3852	124427	15.77
	0.7	37533	3852	124427	15.64
	0.8	37533	3852	124427	17.39
	0.9	37533	3852	124427	17.95

5.4.1.1. Teste 1 – Variação do Rácio de Correspondência dos Pontos-Chave

Este teste tem como objectivo verificar que diferenças existem quando se altera apenas o valor do rácio de correspondência dos pontos-chave. Todas as fases seguintes até à obtenção do modelo final foram realizadas com os valores e opções seleccionados por defeito pelo software.

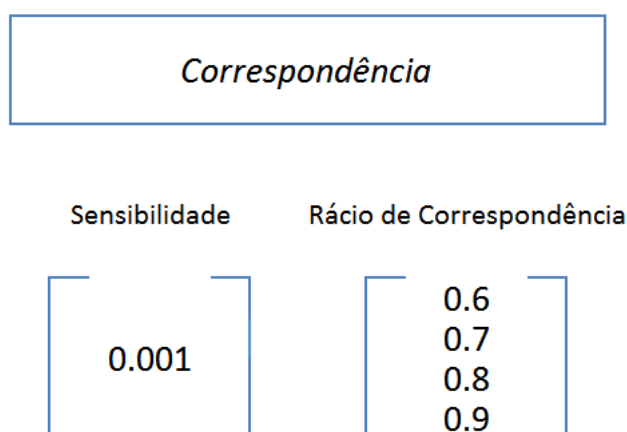


Figura 5.12 – Correspondência Teste 1

Foram realizadas as 3 medições para determinar o factor de escala em todos os modelos, com os resultados médios da Tabela 5.27, e o valor do factor de escala para cada modelo calculado para cada modelo na Tabela 5.28, tendo a cota L um valor real de 60.05 mm.

Tabela 5.27 – Correspondência Teste 1: Valores Medidos da Cota L

Modelo	Valores das Medições da Cota L [mm]			Média [mm]
0.001/0.6	6.55	6.59	6.60	6.58
0.001/0.7	7.28	7.30	7.33	7.30
0.001/0.8	6.96	6.97	6.95	6.96
0.001/0.9	7.25	7.25	7.23	7.24

Tabela 5.28 – Correspondência Teste 1: Valores do Factor de Escala

Modelo	Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
0.001/0.6	60.05/6.58	9.13
0.001/0.7	60.05/7.30	8.23
0.001/0.8	60.05/6.96	8.63
0.001/0.9	60.05/7.24	8.29

Nestes modelos existem algumas cotas pertencentes a faces e arestas com ruído, não sendo possível realizar medições para todas. Das cotas que permitiram ser medidas, com segurança que os pontos seleccionados pertencem realmente à peça, e que são comuns a todos os modelos usados neste teste, os seus resultados para os vários modelos encontram-se apresentados nas tabelas abaixo. As cotas omitidas são aquelas em que não foi possível executar as medições.

Tabela 5.29 – Correspondência Teste 1: Medições das Cotas do Modelo 0.001/0.6

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	34.07	33.99	33.99	34.02	33.11
B	19.00	19.00	18.81	18.94	19.26
C	16.54	16.55	16.46	16.52	17.49
G	63.75	63.35	63.38	63.49	61.93
K	36.81	36.74	36.43	36.66	35.30
L	60.07	60.11	59.58	59.92	60.05
M	37.72	37.72	37.72	37.72	35.59

Tabela 5.30 – Correspondência Teste 1: Medições das Cotas do Modelo 0.001/0.7

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	32.68	32.42	32.76	32.62	33.11
B	18.57	18.56	18.58	18.57	19.26
C	16.31	16.31	16.42	16.35	17.49
G	63.69	63.13	62.91	63.24	61.93
K	36.29	36.35	36.72	36.45	35.30
L	59.72	59.70	59.61	59.68	60.05
M	37.93	37.31	36.90	37.38	35.59

Tabela 5.31 – Correspondência Teste 1: Medições das Cotas do Modelo 0.001/0.8

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	32.89	32.74	32.74	32.79	33.11
B	19.44	19.66	19.72	19.61	19.26
C	17.00	17.07	17.00	17.02	17.49
G	63.55	63.37	63.30	63.41	61.93
K	36.25	35.75	35.94	35.98	35.30
L	60.54	60.63	60.42	60.53	60.05
M	37.79	37.75	37.75	37.76	35.59

Tabela 5.32 – Correspondência Teste 1: Medições das Cotas do Modelo 0.001/0.9

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	32.97	32.80	32.80	32.86	33.11
B	19.58	19.28	19.70	19.52	19.26
C	16.53	16.77	16.53	16.61	17.49
G	62.76	62.89	63.11	62.92	61.93
K	35.75	35.59	35.98	35.77	35.30
L	60.75	60.35	60.21	60.44	60.05
M	36.02	36.09	36.09	36.07	35.59

5.4.1.2. Teste 2 – Variação da Sensibilidade dos Pontos-Chave

O outro parâmetro da fase de *Correspondência* que pode ser alterado é a sensibilidade dos pontos-chave. Mais uma vez, neste teste, todos os restantes parâmetros não são alterados em relação às opções e valores definidos por defeito. Como o modelo com os parâmetros de sensibilidade e rácio de correspondência de valores, respectivamente, 0.001 e 0.6, já foi criado e as suas medições registadas no teste anterior, basta apenas realizar as medições das cotas para os restantes modelos

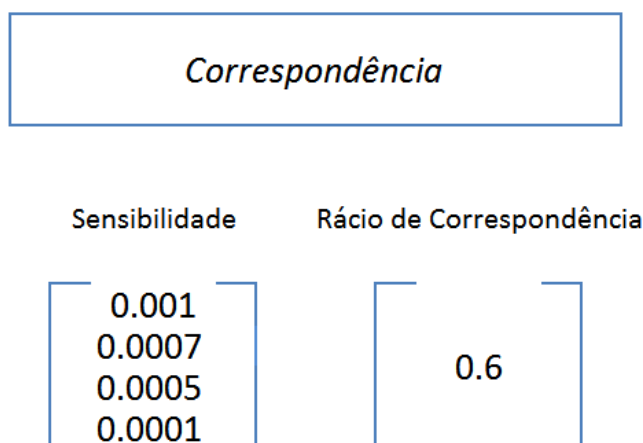


Figura 5.13 – Correspondência Teste 2

Tabela 5.33 – Correspondência Teste 2: Valores Medidos da Cota L

Modelo	Valores das Medições da Cota L [mm]			Média [mm]
0.0007/0.6	6.77	6.80	6.80	6.79
0.0005/0.6	7.04	7.00	7.03	7.02
0.0001/0.6	6.79	6.83	6.86	6.83

Tabela 5.34 – Correspondência Teste 2: Valores do Factor de Escala

<i>Modelo</i>	<i>Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real</i>	<i>Valor do Factor de Escala</i>
0.0007/0.6	60.05/6.79	8.84
0.0005/0.6	60.05/7.02	8.55
0.0001/0.6	60.05/6.83	8.79

Tabela 5.35 – Correspondência Teste 2: Medições das Cotas do Modelo 0.0007/0.6

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	32.97	32.61	32.74	32.77	33.11
B	20.06	20.50	20.19	20.25	19.26
C	16.48	16.25	16.25	16.33	17.49
G	63.76	63.62	64.00	63.79	61.93
K	36.28	36.30	36.50	36.36	35.30
L	60.89	60.86	61.01	60.92	60.05
M	38.71	37.57	38.32	38.20	35.59

Tabela 5.36 – Correspondência Teste 2: Medições das Cotas do Modelo 0.0005/0.6

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	31.82	31.39	31.86	31.69	33.11
B	19.99	20.25	19.82	20.02	19.26
C	17.46	17.31	17.14	17.30	17.49
G	63.89	63.73	63.69	63.77	61.93
K	36.27	36.77	36.37	36.47	35.30
L	59.81	60.04	59.90	59.92	60.05
M	37.15	36.98	37.42	37.18	35.59

Tabela 5.37 – Correspondência Teste 2: Medições das Cotas do Modelo 0.0001/0.6

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	32.96	32.74	33.01	32.90	33.11
B	19.88	19.68	19.85	19.80	19.26
C	16.57	16.44	17.07	16.69	17.49
G	63.55	63.19	63.52	63.42	61.93
K	36.14	36.04	36.14	36.11	35.30
L	59.63	60.01	59.99	59.88	60.05
M	37.80	37.62	37.51	37.64	35.59

5.4.2. Triangulações

Na fase de *Triangulação* existem dois métodos já mencionados anteriormente, e ainda uma opção que permite aperfeiçoar os parâmetros intrínsecos da câmara. Nos seguintes testes o objectivo será comparar as diferenças dos valores das cotas usando os dois métodos, e as alterações que possam acontecer aperfeiçoando os parâmetros intrínsecos.

5.4.2.1. Teste 1 – Ausência de Aperfeiçoamento dos Parâmetros Intrínsecos no Método Incremental

Como o subtítulo sugere, este teste serve para verificar que alterações ocorrem quando a opção de aperfeiçoamento dos parâmetros intrínsecos está desligada, em comparação com a opção activa para o método *Incremental*. Como por defeito a opção está sempre ligada e o método seleccionado é o *Incremental*, então o modelo utilizado no primeiro teste das *Correspondências* com 0.001/0.6 serve para a comparação, bastando obter o modelo com as mesmas definições mas apenas com a opção de aperfeiçoamento dos parâmetros intrínsecos desligada.

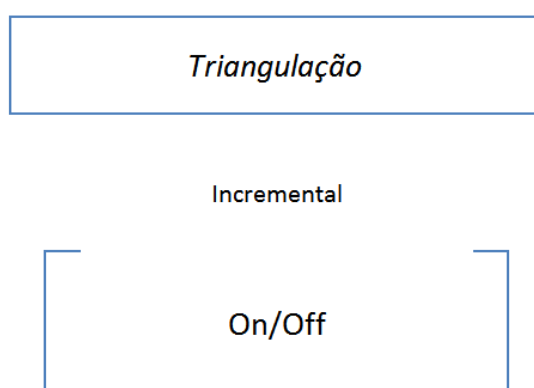


Figura 5.14 – Triangulação Teste 1

Tabela 5.38 – Triangulação Teste 1: Valores Medidos da Cota L

Modelo	Valores das Medições da Cota L [mm]			Média [mm]
Aperfeiçoamento Off	6.64	6.58	6.59	6.60

Tabela 5.39 – Triangulação Teste 1: Valores do Factor de Escala

Modelo	Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
Aperfeiçoamento Off	60.05/6.60	9.10

Tabela 5.40 – Triangulação Teste 1: Medições das Cotas do Modelo Aperfeiçoamento Off

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
C	16.94	16.75	16.56	16.75	17.49
G	62.11	62.08	62.24	62.14	61.93
K	37.16	36.57	36.26	36.66	35.30
L	60.00	60.10	59.79	59.96	60.05
M	37.37	36.61	36.85	36.94	35.59

5.4.2.2. Teste 2 – Ausência de Aperfeiçoamento dos Parâmetros Intrínsecos no Método Global

No segundo teste da *Triangulação* são comparados dois modelos obtidos pelo método *Global*, um com a opção de aperfeiçoamento ligado e outro com a mesma opção desligada.

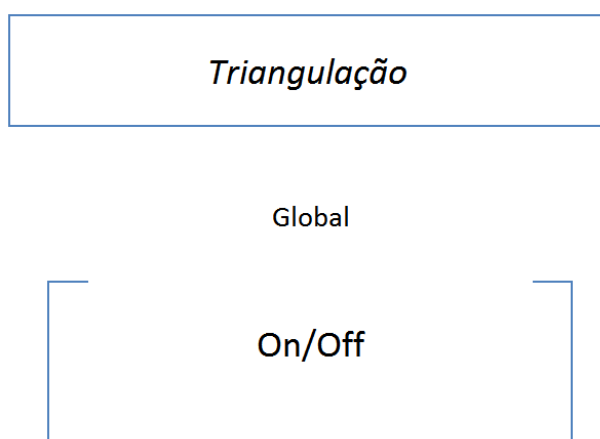


Figura 5.15 – Triangulação Teste 2

Tabela 5.41 – Triangulação Teste 2: Valores Medidos da Cota L

Modelo	Valores das Medições da Cota L [mm]			Média [mm]
Aperfeiçoamento On	0.29	0.29	0.29	0.29
Aperfeiçoamento Off	0.29	0.29	0.29	0.29

Tabela 5.42 – Triangulação Teste 2: Valores do Factor de Escala

Modelo	Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
Aperfeiçoamento On	60.05/0.29	207.07
Aperfeiçoamento Off	60.05/0.29	207.07

Tabela 5.43 – Triangulação Teste 2: Medições das Cotas do Modelo Aperfeiçoamento On

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	32.63	32.20	32.00	32.28	33.11
B	19.47	19.73	19.60	19.60	19.26
C	17.18	17.56	17.02	17.25	17.49
K	35.68	35.91	36.32	35.97	35.30
L	60.51	60.13	59.86	60.17	60.05
M	37.88	37.88	37.69	37.82	35.59

Tabela 5.44 – Triangulação Teste 2: Medições das Cotas do Modelo Aperfeiçoamento Off

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	32.81	31.71	32.19	32.24	33.11
B	20.51	20.51	20.26	20.43	19.26
C	17.34	17.78	17.21	17.44	17.49
K	35.78	35.94	36.04	35.92	35.30
L	60.33	60.36	60.12	60.27	60.05
M	37.72	37.33	38.07	37.71	35.59

5.4.2.3. Teste 3 – Método Incremental e Método Global, Ambos com Aperfeiçoamento

No último teste da *Triangulação* são comparados dois modelos obtidos por métodos diferentes, *Incremental* e *Global*, mas com a opção de aperfeiçoamento ligada. Como nos Testes 1 e 2 foram já usados registados dados para os dois métodos, então pode-se utilizar os mesmos para realizar este teste, mais concretamente os dados presentes na Tabela 5.29 e na Tabela 6.37, respectivamente os modelos referentes ao métodos *Incremental* e *Global*.

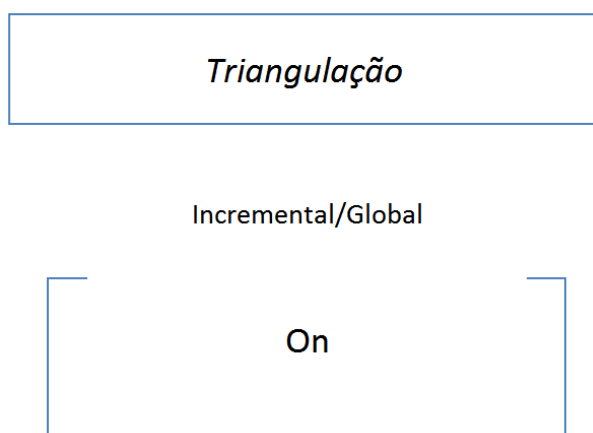


Figura 5.16 – Triangulação Teste 3

5.4.3. Densificações

Na fase de *Densificação* existem vários parâmetros, no entanto, existem dois que alterando o valor definido por defeito apresentam, como resultado, modelos que são impossíveis de medir as suas cotas devido ao ruído. Os parâmetros em causa são o parâmetro *Level* para o método *CMVS/PMVS* e o parâmetro *Scale* para o método *MVE*. Provavelmente por o programa não se encontrar numa versão definitiva) poderá ter algum impacto para o resultado de modelos tão ruidosos. Todos os restantes parâmetros são possíveis de alterar, obtendo-se modelos possíveis de executar medições e a respectiva comparação.

5.4.3.1. Teste 1 – Ausência da Opção Visibilidade

O primeiro teste da *Densificação* compara dois modelos, um com a opção de *Visibilidade* ligada e o outro modelo com a mesma opção desligada. Como por defeito a opção está ligada, os dados para este modelo já foram registados num dos testes anteriores. Foram utilizados modelos com as definições de pontos-chave *Normal/Normal*, i.e., 0.0007/0.6, então os dados do modelo correspondente ao modelo com a opção ligada encontram-se no Teste 2 da fase da *Correspondência*, mais precisamente as medições das suas cotas na Tabela 5.35.

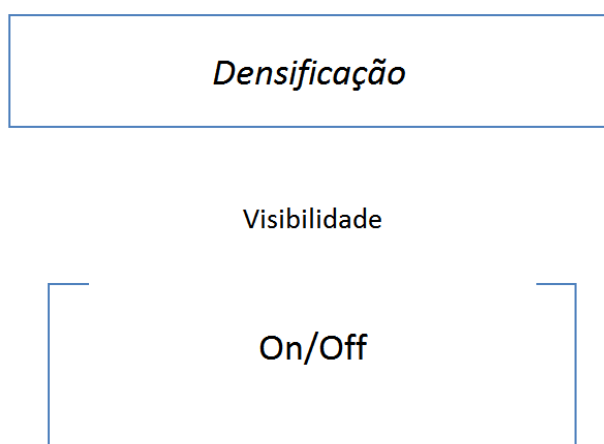


Figura 5.17 – Densificação Teste 1

Tabela 5.45 – Densificação Teste 1: Valores Medidos da Cota L

Modelo	Valores das Medições da Cota L [mm]			Média [mm]
Visibilidade Off	5.99	6.01	6.06	6.02

Tabela 5.46 – Densificação Teste 1: Valores do Factor de Escala

Modelo	Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
Visibilidade Off	60.05/6.02	9.98

Tabela 5.47 – Densificação Teste 1: Medições das Cotas do Modelo Visibilidade Off

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	33.23	33.27	32.36	32.95	33.11
B	20.63	20.11	20.90	20.55	19.26
C	17.06	17.11	17.11	17.09	17.49
G	61.10	60.68	60.34	60.71	61.93
K	36.57	36.85	36.82	36.75	35.30
L	64.22	64.01	64.17	64.13	60.05
M	37.17	36.95	36.74	36.95	35.59

5.4.3.2. Teste 2 – Método *CMVS/PMVS* e Método *MVE*

Neste teste o objectivo é comparar os modelos obtidos pelos dois métodos disponíveis, o *CMVS/PMVS* e o *MVE*, usando os parâmetros definidos por defeito nos dois casos. Mais uma vez, como o método *CMVS/PMVS* é o método seleccionado por defeito, os dados do modelo referentes a esse método encontram-se já registados na Tabela 5.35.



Figura 5.18 – Densificação Teste 2

Tabela 5.48 – Densificação Teste 2: Valores Medidos da Cota L

Modelo	Valores das Medições da Cota L [mm]			Média [mm]
MVE	6.14	6.11	6.11	6.12

Tabela 5.49 – Densificação Teste 2: Valores do Factor de Escala

Modelo	Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
MVE	60.05/6.12	9.81

Tabela 5.50 – Densificação Teste 2: Medições das Cotas do Modelo MVE

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	31.98	32.49	32.22	32.23	33.11
B	19.87	20.50	19.84	20.07	19.26
C	17.07	17.38	17.38	17.28	17.49
G	63.91	63.22	63.92	63.68	61.93
K	35.81	35.99	35.55	35.78	35.30
L	59.95	59.31	59.79	59.68	60.05
M	36.33	36.15	36.28	36.25	35.59

5.4.3.3. Teste 3 – Alteração do Parâmetro *Images per Cluster*

No Teste 3 o objectivo é comparar modelos com o parâmetro *Images per Cluster* diferente. Usando o modelo com o valor por defeito, 100, e com os seus dados já registados como referido nos testes anteriores da *Densificação*, e um modelo com o parâmetro definido em 500.



Figura 5.19 – Densificação Teste 3

Tabela 5.51 – Densificação Teste 3: Valores Medidos da Cota L

Modelo	Valores das Medições da Cota L [mm]			Média [mm]
Images per Cluster 500	5.99	6.04	6.03	6.02

Tabela 5.52 – Densificação Teste 3: Valores do Factor de Escala

Modelo	Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
Images per Cluster 500	60.05/6.02	9.98

Tabela 5.53 – Densificação Teste 3: Medições das Cotas do Modelo Images per Cluster 500

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	32.27	32.63	32.26	32.39	33.11
B	20.68	20.68	20.46	20.61	19.26
C	17.25	16.81	17.07	17.04	17.49
G	64.31	64.32	63.71	64.11	61.93
K	36.10	36.62	36.87	36.53	35.30
L	60.21	60.56	60.48	60.42	60.05
M	36.89	37.84	37.47	37.40	35.59

5.4.3.4. Teste 4 – Alteração do Parâmetro *Tamanho de Célula*

Este teste tem como objectivo comparar as diferenças nas dimensões das cotas de dois modelos com *Tamanhos de Célula* diferentes. Usando o valor por defeito (2) e um outro valor (5), é necessário apenas registar os dados para este último modelo.

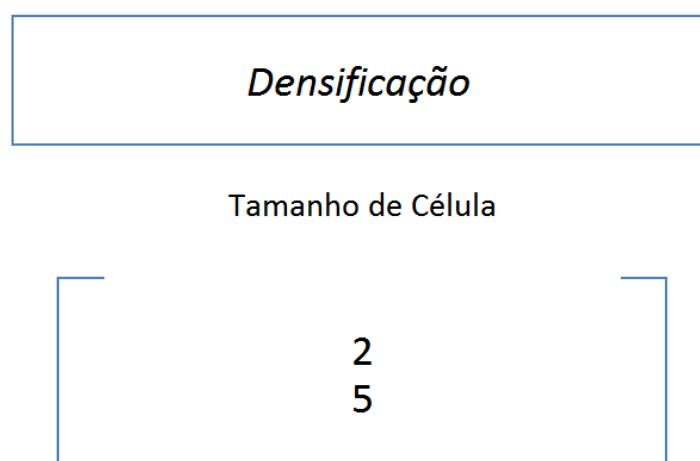


Figura 5.20 – Densificação Teste 4

Tabela 5.54 – Densificação Teste 4: Valores Medidos da Cota L

<i>Modelo</i>	<i>Valores das Medições da Cota L [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>
Tamanho de Célula 5	6.09	6.10	6.09	6.09

Tabela 5.55 – Densificação Teste 4: Valores do Factor de Escala

<i>Modelo</i>	<i>Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real</i>	<i>Valor do Factor de Escala</i>
Tamanho de Célula 5	60.05/6.09	9.86

Tabela 5.56 – Densificação Teste 4: Medições das Cotas do Modelo Tamanho de Célula 5

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	33.02	32.88	32.95	32.95	33.11
C	17.67	17.97	17.88	17.84	17.49
F	38.47	38.51	38.16	38.38	38.72
G	62.93	62.54	62.99	62.82	61.93
I	35.20	34.90	34.64	34.91	32.80
K	35.75	36.57	36.57	36.30	35.30
L	59.80	59.71	60.10	59.87	60.05
M	36.55	36.34	36.41	36.43	35.99

5.4.3.5. Teste 5 – Alteração do Parâmetro *Threshold*

Tal como o subtítulo indica, este teste compara dois modelos com valores do parâmetro *Threshold* díspares. Usando mais uma vez o modelo com as definições por defeito, que tem um valor de *Threshold* definido de 0.7, com um modelo com o valor 0.9, cujos dados das suas dimensões encontram-se registados nas tabelas abaixo.

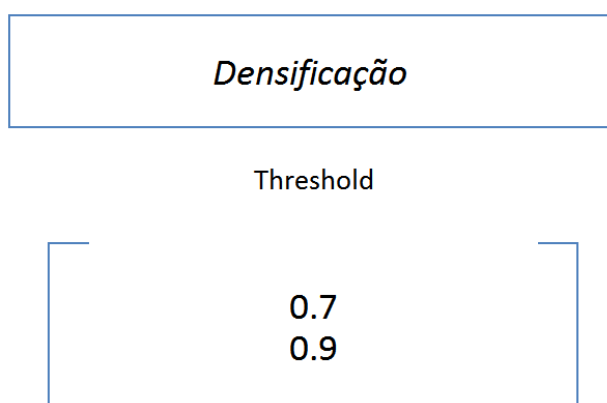


Figura 5.21 – Densificação Teste 5

Tabela 5.57 – Densificação Teste 5: Valores Medidos da Cota L

<i>Modelo</i>	<i>Valores das Medições da Cota L [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>
Threshold 0.9	6.08	6.10	6.06	6.08

Tabela 5.58 – Densificação Teste 5: Valores do Factor de Escala

<i>Modelo</i>	<i>Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real</i>	<i>Valor do Factor de Escala</i>
Threshold 0.9	60.05/6.08	9.88

Tabela 5.59 – Densificação Teste 5: Medições das Cotas do Modelo Threshold 9

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	32.12	32.44	32.46	32.34	33.11
B	18.95	19.07	19.06	19.03	19.26
C	17.35	17.37	17.15	17.29	17.49
G	63.33	63.19	63.33	63.28	61.93
K	36.07	36.22	36.50	36.26	35.30
L	59.81	59.97	59.86	59.88	60.05
M	36.46	36.19	36.19	36.28	35.59

5.4.3.6. Teste 6 – Alteração do Parâmetro wsize

Neste teste alterou-se o valor do parâmetro wsize e comparou-se o modelo resultante com o modelo obtido com os parâmetros definidos por defeito. Para o novo modelo foi seleccionado um valor de 16 para o parâmetro wsize, enquanto o valor por defeito é de 7.

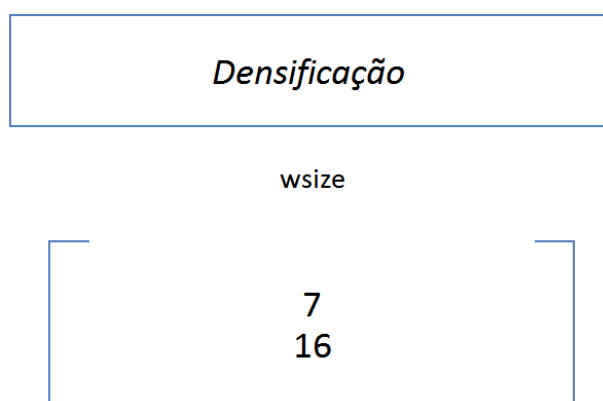


Figura 5.22 – Densificação Teste 6

Tabela 5.60 – Densificação Teste 6: Valores Medidos da Cota L

<i>Modelo</i>	<i>Valores das Medições da Cota L [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>
wsize 16	6.05	5.98	6.03	6.02

Tabela 5.61 – Densificação Teste 6: Valores do Factor de Escala

<i>Modelo</i>	<i>Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real</i>	<i>Valor do Factor de Escala</i>
wsize 16	60.05/6.02	9.98

Tabela 5.62 – Densificação Teste 6: Medições das Cotas do Modelo wsize 16

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	33.10	33.10	33.02	33.07	33.11
B	20.19	19.81	20.11	20.04	19.26
C	17.74	18.21	18.18	18.04	17.49
G	63.88	64.39	64.42	64.23	61.93
K	36.25	36.69	36.51	36.48	35.30
L	60.42	60.19	60.40	60.34	60.05
M	37.13	37.45	37.12	37.23	35.59

5.4.3.7. Teste 7 – Alteração do Parâmetro *Número Mínimo de Imagens*

O modelo obtido com os valores dos parâmetros seleccionados por defeito tem definido duas imagens como *Número Mínimo de Imagens*. De forma a comparar as alterações que este parâmetro implica no modelo final, o Teste 7 compara o referido modelo com um outro modelo com um *Número Mínimo de Imagens* definido como três.

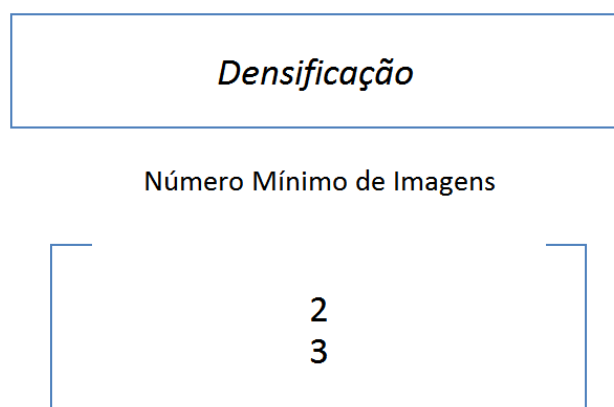


Figura 5.23 – Densificação Teste 7

Tabela 5.63 – Densificação Teste 7: Valores Medidos da Cota L

<i>Modelo</i>	<i>Valores das Medições da Cota L [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>
Número Mínimo de Imagens 3	6.03	6.04	6.04	6.04

Tabela 5.64 – Densificação Teste 7: Valores do Factor de Escala

<i>Modelo</i>	<i>Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real</i>	<i>Valor do Factor de Escala</i>
Número Mínimo de Imagens 3	60.05/6.04	9.94

Tabela 5.65 – Densificação Teste 7: Medições das Cotas do Modelo Número Mínimo de Imagens 3

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	33.28	32.97	32.85	33.03	33.11
B	19.87	19.39	19.59	19.62	19.26
C	17.23	16.90	16.91	17.01	17.49
G	63.33	63.75	63.28	63.45	61.93
K	35.86	36.65	36.13	36.21	35.30
L	59.30	59.51	59.54	59.45	60.05
M	37.44	37.73	37.78	37.65	35.59

5.4.3.8. Teste 8 – Alteração do Parâmetro *Largura de Filtro*

Neste teste são comparados dois modelos com diferentes valores para o parâmetro *Largura de Filtro* no método *MVE*. Usando o valor seleccionado automaticamente quando escolhido o método *MVE*, ou seja, o valor 5, e um novo valor, 9, é apenas necessário realizar medições neste último modelo, visto que o primeiro modelo já tem as medições registadas na Tabela 5.50

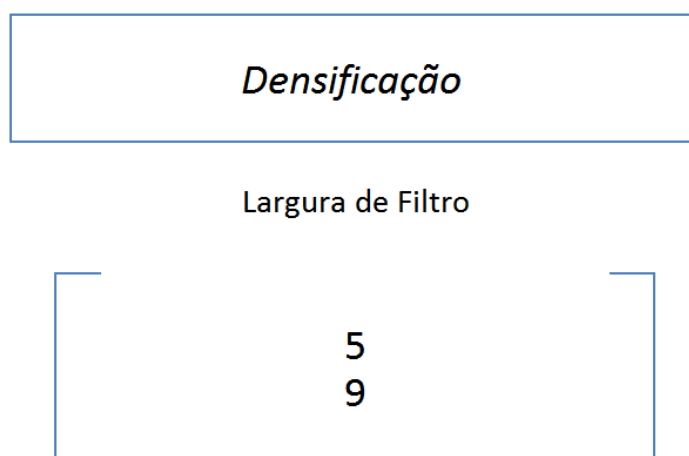


Figura 5.24 – Densificação Teste 8

Tabela 5.66 – Densificação Teste 8: Valores Medidos da Cota L

<i>Modelo</i>	<i>Valores das Medições da Cota L [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>
Largura de Filtro 9	6.06	6.08	6.04	6.06

Tabela 5.67 – Densificação Teste 8: Valores do Factor de Escala

<i>Modelo</i>	<i>Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real</i>	<i>Valor do Factor de Escala</i>
Largura de Filtro 9	60.05/6.06	9.91

Tabela 5.68 – Densificação Teste 8: Medições das Cotas do Modelo Largura de Filtro 9

<i>Cota</i>	<i>Medições [mm]</i>			<i>Média [mm]</i>	<i>Valores de Referência [mm]</i>
A	32.54	32.35	32.32	32.40	33.11
B	20.04	19.83	19.57	19.81	19.26
C	16.82	16.78	17.09	16.90	17.49
G	64.29	63.94	63.92	64.05	61.93
K	36.55	36.70	36.16	36.47	35.30
L	60.65	60.78	59.86	60.43	60.05
M	36.68	36.49	36.25	36.47	35.59

5.4.4. Superfícies

Na última fase, a *Criação de Superfície*, nem todos os parâmetros foram estudados, pois alterando os seus valores, os modelos resultantes seriam ficheiros com tamanhos enormes (*Depth*) e impossíveis de executar medições pois o software não conseguia correr os mesmos, ou modelos completamente distorcidos (*Scale*) e com as arestas longes das arestas da peça original, e num caso, o próprio programa não conseguir criar mesmo um modelo (*Levels*). Deste modo, os parâmetros referidos foram inalterados ficando assim os valores seleccionados por defeito. Mais uma vez de referir que a versão do *Regard3D* não se trata de uma versão final. Todos os outros parâmetros resultaram em modelos satisfatórios, e os testes executados são apresentados de seguida.

5.4.4.1. Teste 1 – Alteração do Parâmetro *Samples per Node*

Este primeiro teste compara os valores das cotas que são medidas tendo sido alterado os valores de *Samples per Node* para 13, enquanto o valor por defeito é 1, e os resultados obtidos são apresentados abaixo.

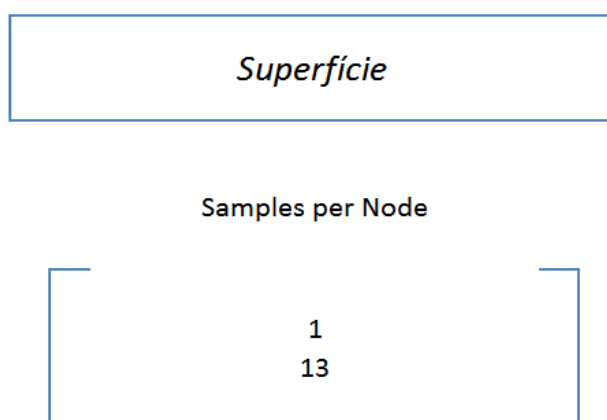


Figura 5.25 – Superfície Teste 1

Tabela 5.69 – Superfície Teste 1: Valores Medidos da Cota L

Modelo	Valores das Medições da Cota L [mm]			Média [mm]
Samples per Node 13	6.11	6.09	6.11	6.10

Tabela 5.70 – Superfície Teste 1: Valores do Factor de Escala

Modelo	Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
Samples per Node 13	60.05/6.10	9.84

Tabela 5.71 – Superfície Teste 1: Medições das Cotas do Modelo Samples per Node 13

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	32.81	32.38	32.28	32.33	33.11
B	19.99	20.34	20.52	20.28	19.26
C	16.59	16.24	16.69	16.51	17.49
G	63.11	62.65	62.78	62.85	61.93
K	36.09	36.44	36.04	36.19	35.30
L	59.34	59.32	59.55	59.40	60.05
M	37.33	37.65	37.88	37.62	35.59

5.4.4.2. Teste 2 – Alteração do Parâmetro *Point Weight*

No Teste 2 o parâmetro *Point Weight*, que por defeito tem o seu valor seleccionado em 4, foi alterado para o dobro, 8, e as medições feitas no modelo resultante estão registadas nas tabelas que se seguem.

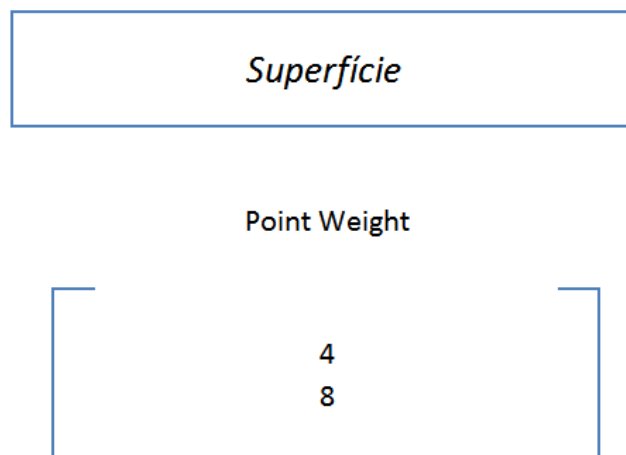


Figura 5.26 – Superfície Teste 2

Tabela 5.72 – Superfície Teste 2: Valores Medidos da Cota L

Modelo	Valores das Medições da Cota L [mm]			Média [mm]
Point Weight 8	6.08	6.04	6.09	6.07

Tabela 5.73 – Superfície Teste 2: Valores do Factor de Escala

Modelo	Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
Point Weight 8	60.05/6.07	9.89

Tabela 5.74 – Superfície Teste 2: Medições das Cotas do Modelo Point Weight 8

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	33.09	32.96	33.25	33.10	33.11
B	19.03	19.06	19.06	19.05	19.26
C	17.15	17.22	17.22	17.20	17.49
G	63.72	63.87	63.84	63.81	61.93
K	36.41	36.43	36.29	36.38	35.30
L	59.85	59.66	59.75	59.75	60.05
M	38.09	37.81	37.49	37.80	35.59

5.4.4.3. Teste 3 – Alteração do Parâmetro *Trim Threshold*

As tabelas abaixo registam os valores das cotas medidas de dois modelos com o parâmetro *Trim Threshold* alterado de 5 para um valor inferior e um valor superior, 1 e 9 respectivamente.

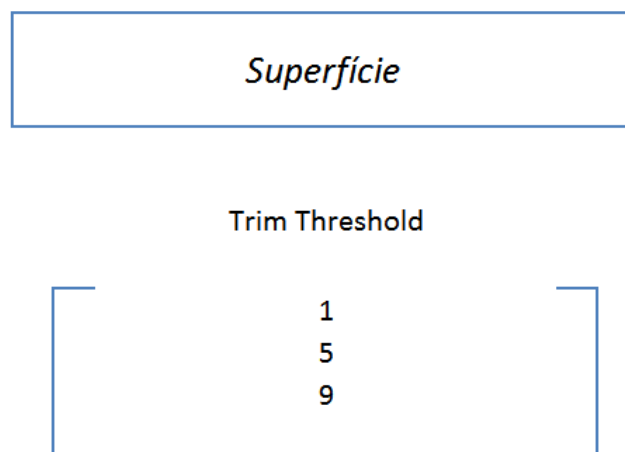


Figura 5.27 – Superfície Teste 3

Tabela 5.75 – Superfície Teste 3: Valores Medidos da Cota L

Modelo	Valores das Medições da Cota L [mm]			Média [mm]
Trim Threshold 1	6.01	6.04	6.02	6.02
Trim Threshold 9	6.01	5.99	6.00	6.00

Tabela 5.76 – Superfície Teste 3: Valores do Factor de Escala

Modelo	Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
Trim Threshold 1	60.05/6.02	9.98
Trim Threshold 9	60.05/6.00	10.01

Tabela 5.77 – Superfície Teste 3: Medições das Cotas do Modelo Trim Threshold 1

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	33.18	33.03	32.83	33.01	33.11
B	19.62	19.39	19.82	19.61	19.26
C	17.21	17.35	17.23	17.26	17.49
G	64.06	63.95	64.16	64.06	61.93
K	36.82	36.79	36.66	36.76	35.30
L	59.97	60.13	60.19	60.10	60.05
M	37.84	37.92	38.05	37.94	35.59

Tabela 5.78 – Superfície Teste 3: Medições das Cotas do Modelo Trim Threshold 9

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	32.94	33.01	32.99	32.98	33.11
B	19.57	20.31	16.6	18.83	19.26
C	16.73	17.02	17.18	16.98	17.49
G	64.33	64.14	64.88	64.45	61.93
K	36.79	36.99	36.81	36.86	35.30
L	60.27	60.54	60.42	60.41	60.05
M	38.5	38.9	38.93	38.78	35.59

5.4.4.4. Teste 4 – Alteração do Parâmetro *Confidence Threshold*

Neste teste o objectivo é comparar um modelo obtido pelo método *Floating Scale Surface Reconstruction*, alterando o parâmetro *Confidence Threshold* de 1 para 10. Como o modelo registado na Tabela 5.50 é o modelo com os parâmetros seleccionados por defeito, então basta apenas realizar as medições para o modelo com o parâmetro alterado para 10.

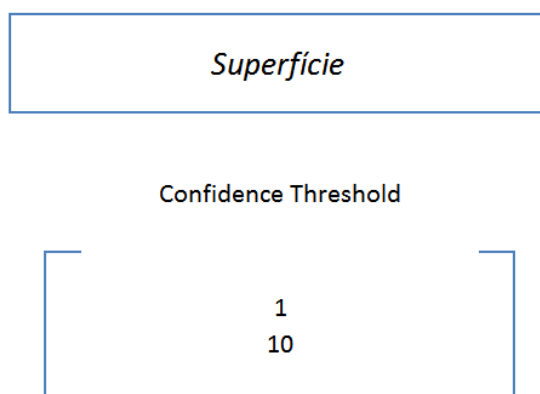


Figura 5.28 – Superfície Teste 4

Tabela 5.79 – Superfície Teste 4: Valores Medidos da Cota L

Modelo	Valores das Medições da Cota L [mm]			Média [mm]
Confidence Threshold 10	6.13	6.13	6.14	6.13

Tabela 5.80 – Superfície Teste 4: Valores do Factor de Escala

Modelo	Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
Confidence Threshold 10	60.05/6.13	9.80

Tabela 5.81 – Superfície Teste 4: Medições das Cotas do Modelo Confidence Threshold 10

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	31.35	31.88	31.75	31.66	33.11
B	20.26	19.82	20.39	20.16	19.26
C	17.42	17.23	17.08	17.24	17.49
G	64.1	64.1	64.35	64.18	61.93
K	35.88	36.09	36.14	36.04	35.30
L	59.94	59.87	59.9	59.90	60.05
M	35.84	35.48	35.92	35.75	35.59

5.4.4.5. Teste 5 – Alteração do Parâmetro *Minimum Component Size*

O último teste também compara um modelo obtido pelo método *Floating Scale Surface Reconstruction*, mas com o parâmetro *Minimum Component Size* diferente do seleccionado por defeito, i.e., 1010 modificado para 4068. Como referido anteriormente o modelo que possui os valores seleccionados por defeito já foi medido, logo, basta apenas registar os valores medidos para o novo valor do parâmetro nas tabelas seguintes.

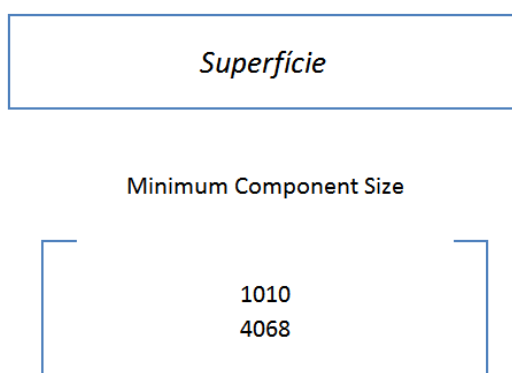


Figura 5.29 – Superfície Teste 5

Tabela 5.82 – Superfície Teste 5: Valores Medidos da Cota L

Modelo	Valores das Medições da Cota L [mm]			Média [mm]
Min. Component Size 4068	6.10	6.12	6.13	6.12

Tabela 5.83 – Superfície Teste 5: Valores do Factor de Escala

Modelo	Relação do Valor da Cota L do Modelo com o Valor Real	Valor do Factor de Escala
Min. Component Size 4068	60.05/6.12	9.81

Tabela 5.84 – Superfície Teste 5: Medições das Cotas do Modelo Minimum Component Size 4068

Cota	Medições [mm]			Média [mm]	Valores de Referência [mm]
A	33.19	32.56	33.07	32.94	33.11
B	19.37	19.33	19.78	19.49	19.26
C	17.46	17.99	17.77	17.74	17.49
G	63.40	63.42	63.10	63.31	61.93
K	36.15	36.05	36.22	36.14	35.30
L	59.89	59.98	60.02	59.96	60.05
M	35.98	36.08	36.25	36.10	35.59

6. Análise de Resultados

Neste capítulo é realizada a análise aos valores das cotas medidas em cada teste. Para uma comparação dos diferentes valores entre os vários modelos e os valores das cotas da peça real, é feito um somatório de todas as diferenças absolutas entre o valor médio e o valor real. Seja um modelo M com n cotas, M_1, M_2, \dots, M_n ..., com os respectivos valores médios V_1, V_2, \dots, V_n , e com os valores verdadeiros das cotas da peça real definidos como $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \dots, \bar{V}_n$. O somatório da diferença absoluta entre o valor médio medido e o valor verdadeiro de cada cota, é expresso na seguinte equação:

$$\sum_i^n |V_i - \bar{V}_i| \quad (6.1)$$

É a partir da expressão (6.1) que a exactidão dos valores das cotas pertencentes aos modelos com diferentes definições de parâmetros é comparada, além do tempo de processamento que cada etapa do processo de construção do modelo final requer, bem como a quantidade de ruído gerado.

6.1. Resultados do *Agisoft PhotoScan*

O *PhotoScan* permite obter, de forma relativamente fácil, um modelo de uma peça final a partir de um conjunto de fotografias tiradas em condições normais. As suas ferramentas de criação de máscara permitem obter modelos completos, o que se torna uma grande mais-valia porque nem sempre existem condições de os objectos serem fotografados com todo um cenário com o mesmo padrão de cor ou que não sejam capturadas outras superfícies não desejadas. Infelizmente a tarefa de criação de máscara aplicada a todo o conjunto de fotografias utilizado acaba por ser um processo muito moroso, estando não só dependente do número de fotografias, mas também da qualidade das mesmas e da geometria da peça. No entanto, o uso destas ferramentas permite que os modelos finais obtidos possuam muito pouco ruído, e a sua remoção é muitas vezes completa apenas com a transformação do modelo para sólido.

A taxa de fotografias rejeitadas na fase de *Alinhamento* é muito pequena, mesmo com fotografias um pouco desfocadas, e as que acabam por ser, são facilmente identificadas pelo programa, o que é uma grande ajuda, pois pode-se excluí-las do conjunto e tirar novas apenas às superfícies em falta. Tanto as fotografias tiradas com o objecto em repouso e a câmara a movimentar-se ao redor – ou de forma equivalente, com a câmara fixa e a peça numa plataforma giratória – ou fotografias tiradas a seções diferentes da superfície da peça, podem ser utilizadas para a reconstrução do modelo final, não exigindo nenhum conhecimento prévio na área da fotografia para que o modelo seja próximo da peça real.

O facto de não haver muitos parâmetros de selecção, permite ao utilizador não criar muitas incertezas sobre quais os valores a seleccionar, e com excepção das configurações muito elevadas, qualquer sistema normal consegue originar um modelo final.

6.1.1. Análise dos Resultados dos Testes

A etapa de *Alinhamento* é aquela onde o utilizador terá de despende a maioria do tempo, devido à necessidade de editar as fotografias para construir as respectivas máscaras. Os restantes procedimentos não possuem muitos parâmetros, o que faz com que a selecção dos mesmos seja breve, e tirando o número de pontos-chave e o número de pontos-nó, os restantes parâmetros não exigem a introdução de um valor, apenas da escolha de uma configuração pré-seleccionada. Se os pontos calculados inicialmente não forem suficientes, a qualidade do modelo final será severamente afectada. A Figura 6.1 contém o número médio de pontos para cada configuração testada na fase de *Alinhamento*. Como referido no capítulo anterior, os modelos obtidos com a precisão definida em *Baixa* e *Muito Baixa* não eram modelos completos, e muita das vezes longe até da forma da peça real. É claro pelo gráfico abaixo que os modelos com essas configurações têm sensivelmente os mesmos pontos de forma transversal a todas as combinações de número de pontos-chave e pontos-nó. Também é perceptível que para as restantes precisões, o número de pontos aumenta consideravelmente com o aumento do número de pontos-nó, e que para 1000 pontos-nó a precisão *Média* é aquela que consegue resultados com uma maior quantidade de pontos, seguida da precisão *Elevada*. O que leva a ser possível concluir que com um número de pontos-nó baixo os modelos com a precisão *Muito Elevada* não são os que mais pontos possuem. Incrementando o valor desse parâmetro, os modelos com as definições mais altas têm muito mais pontos do que os restantes.

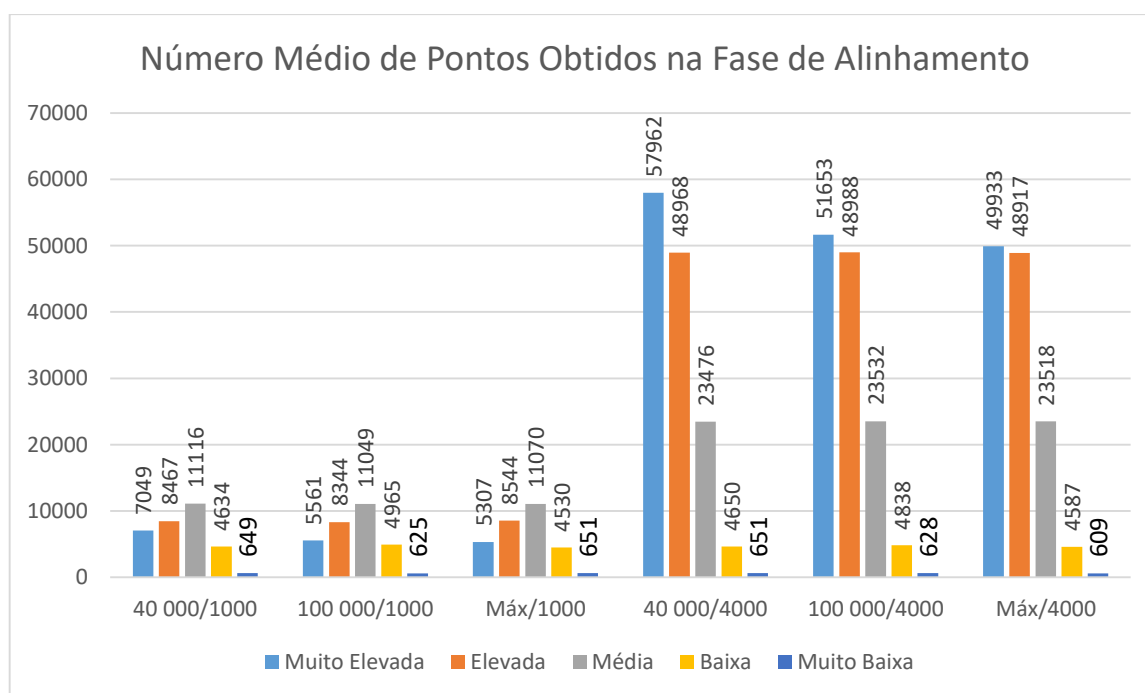


Figura 6.1 – PhotoScan: Número Médio de Pontos

Seria expectável que um número maior de pontos calculados implicaria um tempo superior de processamento. No entanto, observando o gráfico da Figura 6.2, os tempos para cada precisão são similares para os mesmos números de pontos-nó. O que permite desde já afirmar que, pelo menos para a primeira fase, para o mesmo conjunto de fotografias com exactamente as mesmas máscaras aplicadas, o tempo de processamento é apenas dependente do número de pontos-chave.

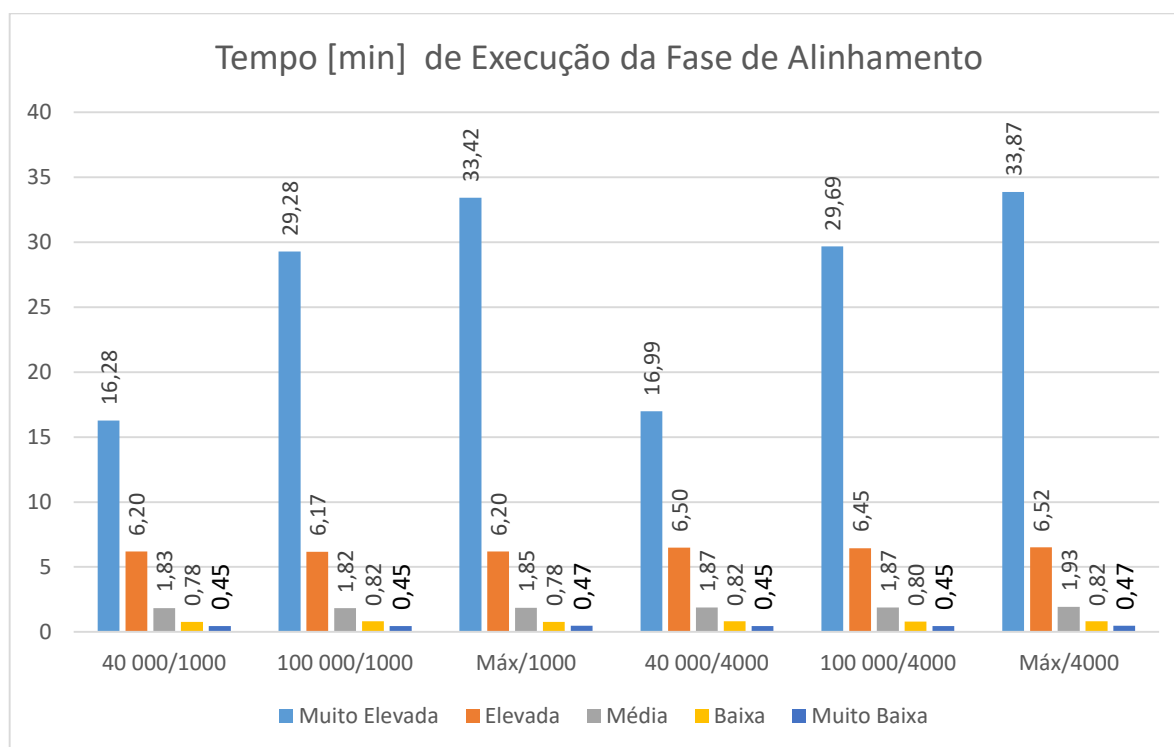


Figura 6.2 – PhotoScan: Tempo de Execução do Alinhamento

Pelas diferenças entre as cotas medidas dos modelos com diferentes pontos-chave e os valores reais (Tabela 6.1), o modelo que apresenta resultados mais exactos é o modelo com 40 000 pontos-chave, com um somatório de diferenças dos modelos com 100 000 e o valor máximo de, respectivamente, 42.67% e 14.84% superior em relação ao primeiro modelo. O número de pontos-chave em 100 000 e no seu valor máximo demora cerca do dobro do tempo na fase de *Alinhamento* e os resultados são menos próximos que os valores reais. Tal como descrito no manual do programa [26], definir um número de pontos muito alto pode levar ao surgimento de pontos não fiáveis. Assim, em caso de dúvida de qual o valor do número de pontos a seleccionar, é preferível apontar para um número mais baixo do que valores muito elevados.

Tabela 6.1 – PhotoScan: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 1 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro		
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo 40 000/4000	Modelo 100 000/4000	Modelo Máx/4000
A	33.11	0.13	0.75	0.58
B	19.26	0.32	0.61	0.02
C	17.49	0.56	0.04	0.24
D	24.21	0.32	0.47	0.34
E	12.93	0.44	0.08	0.03
F	38.72	0.66	0.29	0.55
G	61.93	0.39	1.32	0.12
H	19.90	0.10	0.03	0.69
I	32.80	0.17	0.04	0.24
J	49.43	0.68	0.72	1.05
K	35.30	0.99	1.47	0.91
L	60.05	0.33	0.93	0.71
M	35.59	0.30	0.93	0.70
N	8.11	0.00	0.01	0.01
Total [mm]		5.39	7.69	6.19

Outro factor que pode levar a que diferentes modelos tenham diferentes valores nas suas cotas, é a reconstrução de certas áreas do modelo que não foram definidas. Geralmente por poucas fotografias terem capturado essas mesmas áreas. A Figura 6.3 ilustra um modelo em que as faces da peça que serviram de base não foram, naturalmente, definidas por estarem ausentes de qualquer fotografia. Quando o *AutoDesk Meshmixer* converte para sólido este mesmo modelo, as faces ausentes irão ser construídas sem nenhuma informação prévia, o que pode levar a que as suas dimensões sejam diferentes da peça real. Uma forma de minimizar este problema é acrescentar ao conjunto de fotografias usado, fotografias novas com outra face a servir de base. Esta solução foi empregada, por exemplo, na definição do modelo da peça B.



Figura 6.3 – PhotoScan: Faces da Base do Modelo

No segundo teste foi usado um modelo com um número de pontos-nó diferente, 1000, e com 40 000 pontos-chave, e as diferenças dos valores das cotas medidas em relação à peça real são apresentadas na tabela seguinte.

Tabela 6.2 – PhotoScan: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 2 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo 40 000/1000	Modelo 40 000/4000
A	33.11	0.11	0.13
B	19.26	0.17	0.32
C	17.49	0.07	0.56
D	24.21	0.52	0.32
E	12.93	0.39	0.44
F	38.72	0.44	0.66
G	61.93	1.05	0.39
H	19.90	0.11	0.10
I	32.80	0.10	0.17
J	49.43	1.53	0.68
K	35.30	1.33	0.99
L	60.05	1.68	0.33
M	35.59	1.00	0.30
N	8.11	0.01	0.00
Total		8.51	5.39

O somatório das diferenças do modelo com 1000 pontos-nó é 57.88% superior ao somatório do modelo com 4000, tendo apenas seis cotas, em catorze, com diferenças inferiores para o valor real. As cotas em que a diferença é substancialmente elevada, são as cotas D, G, J, K, L e M. Tirando as cotas G, K e M, todas as outras são medidas em áreas em que houve ausência de construção inicialmente, só sendo preenchidos esses espaços quando o modelo foi convertido para sólido. A Figura 6.4 mostra a face da base reconstruída onde é possível notar a quase falta de rugosidade que caracteriza o resto do modelo. A face reconstruída é praticamente lisa, não possuindo praticamente qualquer saliência. No caso em que a peça real possa ser assente em mais do que uma face, é preferível que a face escolhida seja aquela que idealmente se poderia considerar lisa, de forma a que o modelo final se aproxime o mais possível da peça real em termos de geometria. Em termos de tempo de execução desta fase de *Alinhamento*, a redução de tempo em 2.14% usando menos pontos-nó, claramente não compensa, pois o resultado é um modelo muito menos exacto.

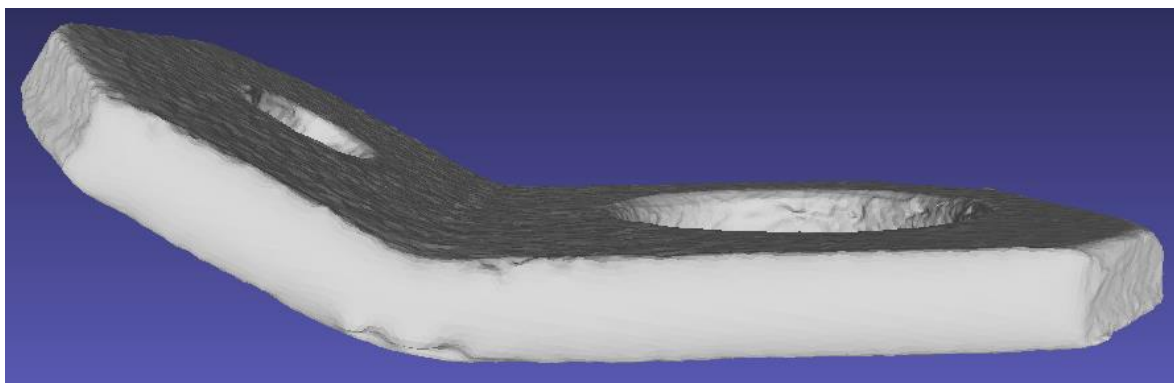


Figura 6.4 – PhotoScan: Faces da Base do Modelo Reconstituída

Analisando os modelos com diferentes precisões de *Alinhamento*, pelos dados recolhidos no Teste 3, os resultados são os expectáveis. Nos somatórios da diferença das cotas do três modelos da Tabela 6.3, com três níveis de precisão (*Média*, *Elevada* e *Muito Elevada*), os resultados indicam que quanto maior for a precisão do *Alinhamento* mais próximo será o modelo final da peça real em termos de dimensões. Os modelos com as precisões *Elevada* e *Muito Elevada* possuem, respectivamente, um somatório de 1.30% e de 39.33% inferior ao somatório do modelo com a precisão *Normal*, o que demonstra que a definição mais elevada consegue resultados muito superiores em relação aos restantes modelos, e que os modelos com precisões *Normal* e *Elevada* têm resultados quase similares.

Tabela 6.3 – PhotoScan: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 3e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro		
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo 40 000/4000 Normal	Modelo 40 000/4000 Elevada	Modelo 40 000/4000 Muito Elevada
A	33.11	0.13	0.47	0.28
B	19.26	0.32	0.17	0.11
C	17.49	0.56	0.10	0.20
D	24.21	0.32	0.11	0.45
E	12.93	0.44	0.26	0.20
F	38.72	0.66	0.09	0.02
G	61.93	0.39	0.10	0.08
H	19.90	0.10	0.62	0.08
I	32.80	0.17	0.27	0.11
J	49.43	0.68	0.48	0.04
K	35.30	0.99	0.88	0.63
L	60.05	0.33	0.93	0.73
M	35.59	0.30	0.83	0.33
N	8.11	0.00	0.01	0.01
Total		5.39	5.32	3.27

No Teste 4 o objectivo foi comparar modelos com diferentes precisões da *Construção da Nuvem Densa*. Os modelos têm 40 000 pontos-chave e 1000 pontos-nó com uma definição *Normal* para a precisão do *Alinhamento*. O modelo com a definição *Elevada* é aquele que apresenta as cotas com menor diferença em relação ao valor real (Tabela 6.4), seguido do modelo *Normal*, e como expectável, o modelo com o parâmetro da precisão definido como *Baixa* é aquele em que o somatório de diferenças é maior. O aumento da precisão implica uma redução dos somatórios de 12.72% entre a precisão *Baixa* e a *Média*, e de 4.11% entre a precisão *Média* e *Elevada*, o que leva a poder concluir que os somatórios de diferenças não diminuem na mesma proporção por cada nível superior de precisão seleccionado. O tempo, em minutos, de processamento desta fase de densificação da nuvem de pontos para cada modelo foi, da precisão *Baixa* à *Elevada*, de 1.45, 6.10 e 42.55. Ou seja, para uma redução de 4.11% no somatório de diferenças é necessário um tempo 597.54% superior em relação ao modelo *Normal*, tornando assim a definição de uma precisão *Elevada* não aconselhável caso o tempo de processamento for uma limitação.

Tabela 6.4 – PhotoScan: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 4 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro		
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Densificação Baixa	Modelo Densificação Normal	Modelo Densificação Elevada
A	33.11	0.41	0.11	0.26
B	19.26	0.08	0.17	1.18
C	17.49	0.20	0.07	0.21
D	24.21	1.35	0.52	0.44
E	12.93	0.49	0.39	0.19
F	38.72	1.11	0.44	0.71
G	61.93	0.21	1.05	0.56
H	19.90	0.08	0.11	0.22
I	32.80	0.02	0.10	0.00
J	49.43	0.85	1.53	0.38
K	35.30	1.66	1.33	1.25
L	60.05	1.26	1.68	2.22
M	35.59	2.03	1.00	0.53
N	8.11	0.00	0.01	0.01
Total		9.75	8.51	8.16

Ainda inserido na fase de *Construção da Nuvem Densa* encontra-se o parâmetro de *Filtragem de Profundidade*, com várias definições já mencionadas anteriormente. Escolhendo os dois níveis opostos, *Agressiva* e *Mild*, no Teste 5 foram comparados dois modelos, com todos os restantes parâmetros iguais, e cada um com um nível de *Filtragem de Profundidade* diferente. Com a definição *Mild* os pequenos detalhes da peça real terão uma maior influencia no modelo final. Pela análise dos resultados expostos na Tabela 6.5, a diferenças entre os dois modelos é pouco significativa, com a definição *Mild* a ter um tempo de processamento 0.63 minutos mais rápido, e a ter oito das catorze cotas com uma diferença superior ao modelo com a definição *Agressiva*. Como a peça real utilizada não possui muitos detalhes que se possam considerar pequenos – talvez algumas fendas ou partes da superfície lascadas e riscadas – tais como as restantes peças neste estudo, não é completamente clara a eficácia real deste parâmetro. No entanto, face a uma pequena diferença, uma redução de 3.08% no somatório das diferenças, e com apenas um aumento de 11.52% do tempo de processamento nesta fase, e se a precisão escolhida não for acima do nível médio (porque o tempo é bastante superior), então a configuração *Agressiva* pode apresentar melhores resultados no modelo final.

Tabela 6.5 – PhotoScan: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 5 e a Peça Real

<i>Cota</i>		<i>Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro</i>	
<i>Identificação</i>	<i>Valor de Referência [mm]</i>	<i>Modelo Agressiva</i>	<i>Modelo Mild</i>
A	33.11	0.11	0.91
B	19.26	0.17	0.19
C	17.49	0.07	0.03
D	24.21	0.52	0.59
E	12.93	0.39	0.36
F	38.72	0.44	0.36
G	61.93	1.05	1.26
H	19.90	0.11	0.50
I	32.80	0.10	0.18
J	49.43	1.53	0.52
K	35.30	1.33	1.58
L	60.05	1.68	1.45
M	35.59	1.00	0.83
N	8.11	0.01	0.02
Total		8.51	8.78

6.2. Resultados do *Regard3D*

Antes de se começar a análise dos resultados obtidos no capítulo anterior, é importante referir mais uma vez que as fotografias das peças reais foram tiradas de forma amadora e com recurso a fundos de cor azul, preta ou magenta. Deste modo, as fotografias conseguidas e utilizadas neste estudo não são fotografias tiradas em condições ideais, e como tal é seguro afirmar que os resultados obtidos teriam sido muito melhores se fosse usado um estúdio profissional. O programa *Regard3D* é extremamente sensível à qualidade das fotografias, sendo que o principal factor que contribui para uma fotografia ser mais razoável que outra é a intensidade luminosa. Por exemplo, as fotografias tiradas em dias mais nublados tiveram que ser excluídas do estudo porque nas primeiras fases de construção do modelo o programa considerava que os pontos obtidos não eram suficientes. Ao contrário do *PhotoScan*, que com mais ou com menos ruído, praticamente qualquer fotografia é validada pelo software, no caso do *Regard3D* sucede-se o inverso, pois a maioria das fotografias obtidas tiveram de ser excluídas.

Outro factor importante está relacionado com o tipo de superfícies das peças, pois mesmo colocando marcadores – desde autocolantes a linhas de diferentes cores pintadas na superfície – os resultados não melhoram consideravelmente. Em peças em que o modelo final não era possível obter, pois o programa não conseguia muitas vezes realizar a fase de *Triangulação* devido a pontos insuficientes, ou nos casos que conseguia apenas uma ou duas posições das fotografias eram reconhecidas, resultando num número total de pontos inferior a uma dezena, o que impossibilitava que as fases seguintes fossem realizadas com sucesso, mesmo com a adição de marcadores os resultados eram semelhantes.

O facto de ser necessário um computador muito acima da média para conseguir correr o programa, torna todo o processo de obtenção do modelo final mais difícil e moroso, porque mesmo com um equipamento com boas características, as fases exigem despende ainda um tempo muito considerável.

6.2.1. Análise dos Resultados da Fase de Correspondência

A fase de *Correspondência* é a fase mais crucial de todo o fluxo de trabalho, pois as fases posteriores estão dependentes dos pontos localizados, e caso o número de pontos seja insuficiente, então o próprio programa não consegue executar a etapa seguinte. Uma das primeiras conclusões que se pode retirar, com o auxílio da Tabela 5.26, é que independentemente de qualquer que seja o valor seleccionado para o rácio de correspondência dos pontos-chave o número de pontos será igual. O valor mínimo, o máximo e médio de pontos são exactamente os mesmos, estando os mesmos apenas dependentes do valor escolhido para o parâmetro da sensibilidade. Na Figura 6.5 é possível observar que o número de pontos é claramente inversamente proporcional à sensibilidade dos pontos-chave, pois reduzindo a sensibilidade sucessivamente em 30%, 28.6% e 80% em relação ao valor anterior, os pontos aumentaram em média 61.2%, 46.6% e 246.8% respectivamente. Ou seja, se o objectivo for um grande número de pontos-chave, então a sensibilidade terá de ser a menor possível.

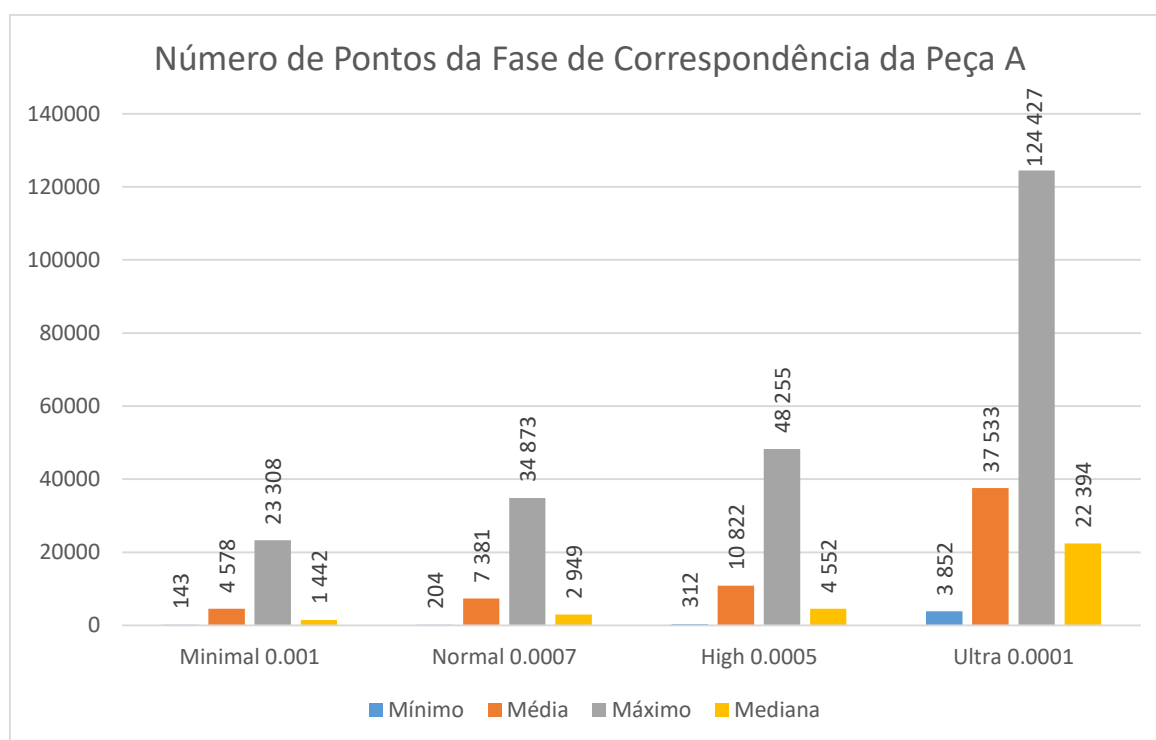


Figura 6.5 – Número de Pontos da Fase de Correspondência da Peça A para os Diferentes Parâmetros de Sensibilidade e Rácio de Correspondência dos Pontos-Chave

Em contrapartida, quanto menor for a sensibilidade dos pontos-chave maior será o tempo de processamento. Se em termos de pontos o rácio de correspondência não têm nenhuma influência, já em termos do tempo de execução não é possível afirmar o mesmo. Como se pode observar pelos dados da Figura 6.6, o tempo altera nas várias definições para os dois parâmetros seleccionáveis. Aumentando o valor do rácio de correspondência aumenta o tempo na maioria dos modelos, mas com a sensibilidade definida no modo Normal e Ultra existem umas pequenas excepções, com um decréscimo pouco significativo, de 0.2% e de 0.8%, respectivamente nas configurações 0.0007/0.8 e 0.0001/0.7. Visto que o equipamento poderá ter corrido um outro programa em segundo plano (p.e. uma actualização, antivírus, etc.) pode-se afirmar que quanto maior for o valor seleccionado para o parâmetro de rácio de correspondência maior será o tempo de execução.

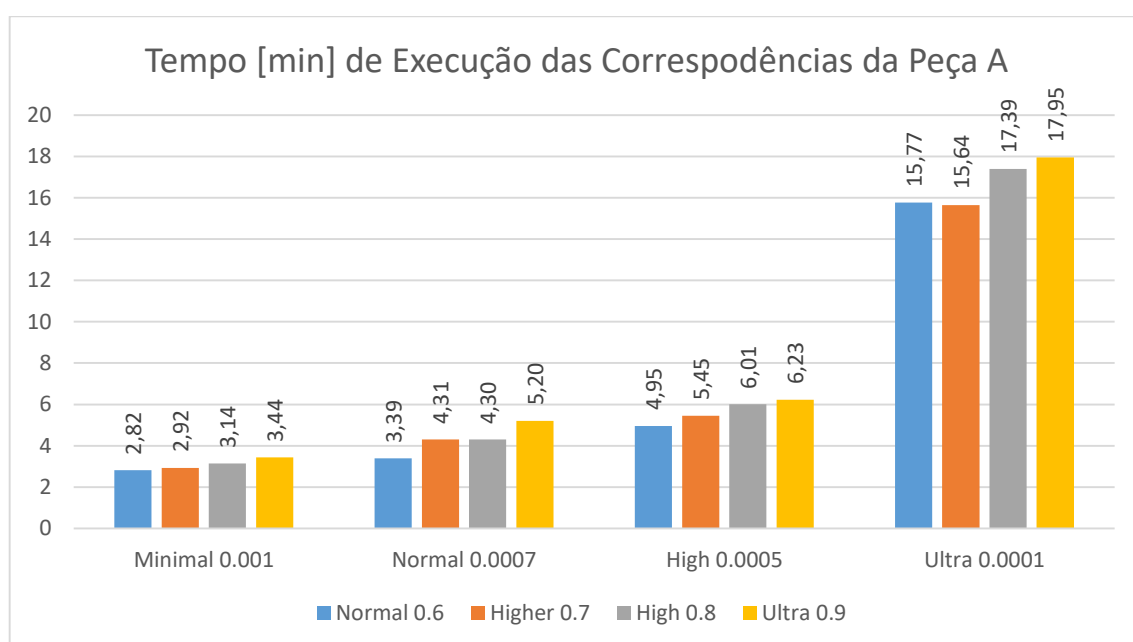


Figura 6.6 – Tempo de Execução das Correspondências da Peça A para os Diferentes Parâmetros de Sensibilidade e Rácio de Correspondência dos Pontos-Chave

Pelo primeiro teste da *Correspondência*, mais concretamente pela Tabela 5.27 pode-se tirar a conclusão que as dimensões do modelo não têm alguma relação com o rácio de correspondência, pois os valores das cotas de referência medidas tanto aumentam como diminuem à medida que é incrementado o valor do rácio de correspondência.

Comparando as diferenças entre os valores médios resultantes das três medições realizadas a cada cota e o valor verdadeiro, a soma das diferenças para cada modelo e o seu total é apresentado na Tabela 6.6. Facilmente se observa que o modelo 0.001/0.9 é aquele que apresenta um menor somatório de diferenças face aos valores verdadeiros das cotas. É também fácil de perceber que quanto mais alto for o valor do rácio de correspondência menor será o somatório do erro, tal como seria expectável.

Tabela 6.6 – Regard3D Correspondências: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 1 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro			
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo 0.001/0.6	Modelo 0.001/0.7	Modelo 0.001/0.8	Modelo 0.001/0.9
A	33.11	0.92	0.48	0.31	0.24
B	19.26	0.32	0.69	0.35	0.26
C	17.49	0.97	1.14	0.47	0.88
G	61.93	1.56	1.31	1.48	0.99
K	35.30	1.36	1.15	0.68	0.47
L	60.05	0.13	0.37	0.48	0.39
M	35.59	2.13	1.79	2.17	0.48
Total [mm]		7.39	6.93	5.94	3.71

No Teste 2 pode-se também concluir que o parâmetro de sensibilidade dos pontos-chave não tem nenhuma influência no tamanho das dimensões dos modelos, como registado pela medição das cotas de referência na Tabela 5.33, tal como o parâmetro do rácio de correspondência. No entanto, pela Tabela 6.7 o modelo 0.001/0.6 possui um somatório menor que o modelo 0.0007/0.6, o que não seria de prever. Quase todas as cotas do modelo 0.0007/0.6 apresentam uma diferença superior às cotas do modelo 0.001/0.6, e por isso pode-se assumir, com alguma segurança, que não se trata de um erro de medição. Os parâmetros 0.0007/0.6 são os parâmetros definidos por defeito pelo *Regard3D*, o que poderá significar que são os parâmetros que se adequam à maioria dos objectos, não sendo o caso da peça em estudo. Todas os restantes modelos indicam que quanto menor for o valor seleccionado para a sensibilidade dos pontos-chave menor será o somatório das diferenças dos erros, o que também seria de esperar pois são os parâmetros que requerem um maior tempo de execução.

Tabela 6.7 – Regard3D Correspondências: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 2 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro			
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo 0.001/0.6	Modelo 0.0007/0.6	Modelo 0.0005/0.6	Modelo 0.0001/0.6
A	33.11	0.92	0.33	1.41	0.20
B	19.26	0.32	0.99	0.76	0.54
C	17.49	0.97	1.16	0.19	0.80
G	61.93	1.56	1.86	1.84	1.49
K	35.30	1.36	1.06	1.17	0.81
L	60.05	0.13	0.87	0.13	0.17
M	35.59	2.13	2.61	1.59	2.05
Total [mm]		7.39	8.88	7.09	6.06

6.2.2. Análise dos Resultados da Fase de Triangulação

Na fase de *Triangulação* para os dois métodos disponíveis, *Incremental* e *Global*, existe uma opção de aperfeiçoamento dos parâmetros intrínsecos. No Teste 1 desta fase comparam-se dois modelos obtidos pelo método *Incremental*, tendo um a opção de aperfeiçoamento ligada e o outro modelo com a mesma opção desligada, sendo os restantes parâmetros iguais entre os dois modelos. Ambos os modelos têm como configuração de *Correspondência* 0.001/0.6. No modelo com o aperfeiçoamento desligado a cota A e a cota B não são possíveis de medir devido ao ruído, e como tal apenas se comparam as cotas que são mensuráveis em ambos os modelos. No entanto, tendo em conta os dados mostrados na Tabela 6.8, é o modelo sem aperfeiçoamento que apresenta uma diferença menor em relação aos valores verdadeiros, em todas as cotas possíveis de serem medidas. O que indica que, pelo menos no modo *Incremental*, o modo com a opção desligada é mais preciso, mas que o aperfeiçoamento reduz o ruído.

Tabela 6.8 – Regard3D Triangulação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 1 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Incremental Aperfeiçoamento On	Modelo Incremental Aperfeiçoamento Off
C	17.49	0.97	0.74
G	61.93	1.56	0.21
K	35.30	1.36	1.36
L	60.05	0.13	0.09
M	35.59	2.13	1.35
Total [mm]		6.15	3.75

Com os resultados do segundo teste, Tabela 6.9, onde se compara os efeitos que a opção de aperfeiçoamento tem nos modelos obtidos pelo método Global, não se podem tirar as mesmas ilações. A diferença dos somatórios indica que o modelo com aperfeiçoamento é o mais adequado, mas uma observação mais atenta aos valores cota a cota, permite descobrir que os valores são na verdade mais similares do que o somatório leva a crer. Em concreto o resultado da cota B para o modelo sem aperfeiçoamento, que tem uma diferença de 244% em relação ao resultado do outro modelo. Ora a cota B é delimitada por uma aresta que no modelo é bastante irregular devido ao ruído. Se for excluída a diferença de valores da cota B, os resultados dos somatórios para os modelos com aperfeiçoamento e sem aperfeiçoamento seriam, respectivamente, 4.08 e 3.87, o que indicaria que o modelo sem aperfeiçoamento seria o mais adequado, à semelhança do método *Incremental*. Deste modo, pode-se afirmar que para ambos os métodos de *Triangulação* a opção de aperfeiçoamento tem como consequência um modelo final mais livre de ruído, com um maior número de cotas mensuráveis, mas com a opção desligada o modelo final será ligeiramente mais preciso em relação à peça real.

Tabela 6.9 – Regard3D Triangulação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 2 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Global Aperfeiçoamento On	Modelo Global Aperfeiçoamento Off
A	33.11	0.82	0.86
B	19.26	0.34	1.17
C	17.49	0.24	0.05
K	35.30	0.67	0.62
L	60.05	0.12	0.22
M	35.59	2.23	2.12
Total [mm]		4.42	5.04

Por último, comparando as diferenças entre os dois métodos, Teste 3, em termos de precisão de dimensões e ruído depende do objectivo final que se pretende, pois para uma maior precisão do modelo tem-se que sacrificar a qualidade do mesmo em termos de ruído. É importante referir que enquanto o modelo obtido pelo método *Incremental* tem as suas fases lisas, tal como a peça real, o modelo obtido pelo método *Global* tem as faces bastantes rugosas, como mostrado na Figura 6.7. Assim, e como se procura um modelo o mais próximo possível à peça real, a opção mais adequada será aquela que permite obter um maior número de semelhanças com a realidade, o que torna mais viável possuir um modelo com uma precisão ligeiramente inferior mas com a maior percentagem da peça representada.

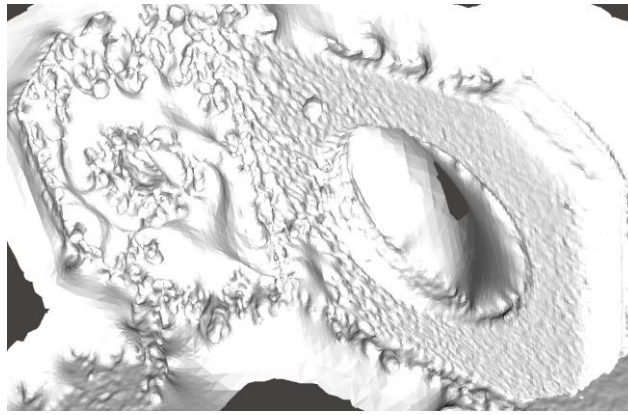


Figura 6.7 – Regard3D: Modelo com Faces Bastantes Rugosas

Em termos de tempos de processamento (Figura 6.8), verifica-se que o tempo necessário para a fase de *Triangulação* é inferior em ambos os modelos obtidos pelo método *Global*, e como o modelo apresenta menos arestas e faces definidas, as fases seguintes são também menos morosas. Somando todos os tempos das diversas fases, é perceptível que o tempo nos modelos obtidos através do método *Incremental* é cerca do dobro dos outros modelos.

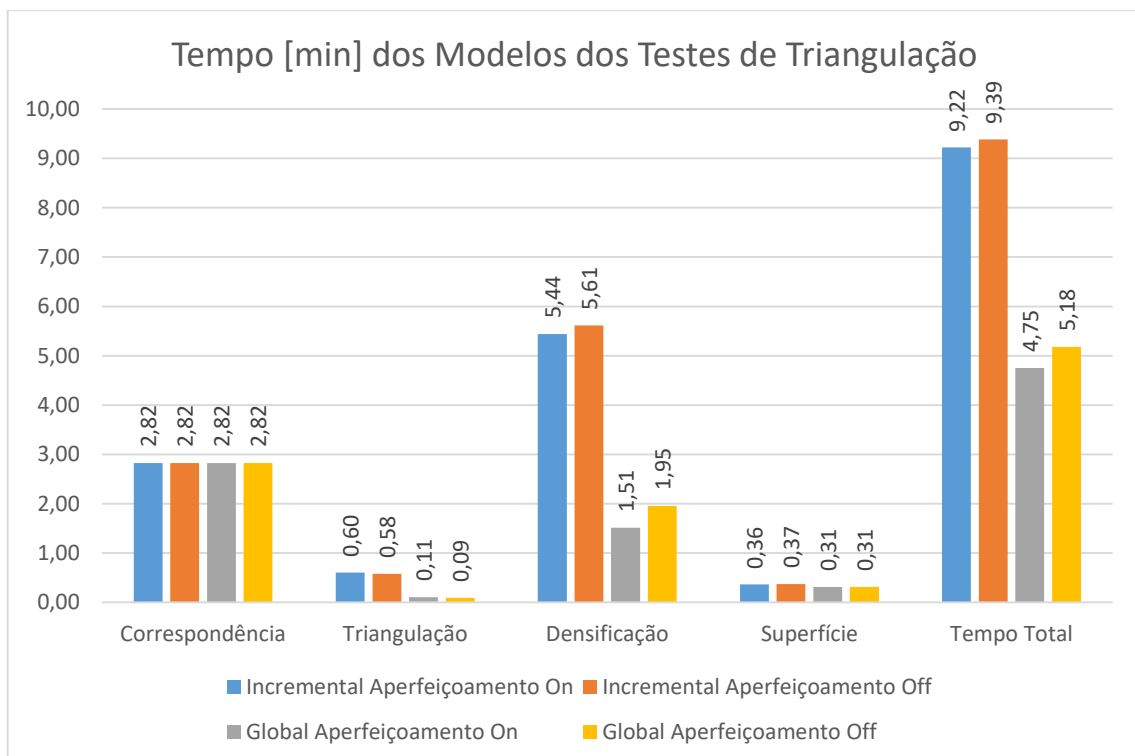


Figura 6.8 – Regard3D: Tempo de Execução da Triangulação

6.2.3. Análise dos Resultados da Fase de Densificação

A fase de *Densificação* foi aquela que permitiu executar o maior número de testes devido à quantidade de parâmetros de selecção disponíveis. O primeiro dos testes aplica-se ao parâmetro de *Visibilidade*, que por defeito se encontra ligado, e para um modelo com a configuração inicial de *Correspondência* Normal/Normal (0.0007/0.6), os resultados dos modelos com a opção ligada e desligada encontram-se na Tabela 6.10. Existem cotas no modelo com a opção desligada em que a diferença de valores é menor em relação ao modelo com a opção ligada, mas das cotas que apresentam um valor superior, a cota L diferencia-se 4.08 mm do valor real, o que resulta que o somatório das diferenças do modelo com visibilidade desligada tem um resultado superior. Em termos de tempos, o modelo com a opção de visibilidade demorou no conjunto de todas as fases 9.66 minutos contra os 12.97 minutos do modelo com a opção desligada.

Tabela 6.10 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 1 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Visibilidade On	Modelo Visibilidade Off
A	33.11	0.33	0.15
B	19.26	0.99	1.29
C	17.49	1.16	0.40
G	61.93	1.86	1.22
K	35.30	1.06	1.45
L	60.05	0.87	4.08
M	35.59	2.61	1.36
Total [mm]		8.88	9.95
Tempo [min]		9.66	12.97

O segundo teste compara dois modelos com as mesmas configurações de *Correspondência* e *Triangulação* mas com métodos distintos na fase de *Densificação*. É facilmente perceptível pela Tabela 6.11 que o modelo obtido pelo método *MVE* apresenta menores diferenças entre os valores medidos e os valores reais, excepto na cota A. Em contrapartida, no modelo em questão, o tempo de processamento é mais que o dobro, 21.95 minutos em relação aos 9.66 minutos que são necessários para o modelo obtido pelo método *CMVS/PMVS*. Os dois modelos foram seleccionados com os parâmetros definidos por defeito.

Tabela 6.11 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 2 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo CMVS/PMVS	Modelo MVE
A	33.11	0.33	0.87
B	19.26	0.99	0.81
C	17.49	1.16	0.21
G	61.93	1.86	1.75
K	35.30	1.06	0.48
L	60.05	0.87	0.37
M	35.59	2.61	0.66
Total [mm]		8.88	5.15
Tempo [min]		9.66	21.95

A Tabela 6.12 contém os resultados de dois modelos com dois valores do parâmetro *Images per Cluster*. O aumento do número de 100 para 500 origina um modelo com um somatório de diferenças ligeiramente menor e um tempo de processamento ligeiramente superior em relação ao modelo com o parâmetro definido por defeito, respectivamente menos 8.78% e mais 7.25%. Não se trata assim de um parâmetro em que a alteração de valores seja um aspecto muito significativo para o resultado do modelo final, no entanto pode ser benéfico aumentar este número pois o ganho em termos de aproximação do modelo à peça real tem sensivelmente o mesmo “custo” em relação ao tempo de processamento.

Tabela 6.12 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 3 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo 100 Images per Cluster	Modelo 500 Images per Cluster
A	33.11	0.33	0.71
B	19.26	0.99	1.35
C	17.49	1.16	0.45
G	61.93	1.86	2.18
K	35.30	1.06	1.23
L	60.05	0.87	0.37
M	35.59	2.61	1.81
Total [mm]		8.88	8.10
Tempo [min]		9.66	10.36

Se o valor seleccionado para o parâmetro anterior não tem grande impacto no modelo final, o mesmo já não pode ser dito do parâmetro que se segue. Alterando o valor do *Tamanho de Célula* (*Cell Size*) de 2 para 5 consegue-se reduzir a diferença das cotas do modelo para o valor das cotas reais em 56.78%, e o tempo de processamento, ao contrário do que seria expectável face ao decréscimo do somatório de diferenças, tem um ganho de 28.67%. Pela Tabela 6.13 observa-se que todas as cotas do modelo com *Tamanho de Célula* 5 têm uma diferença em relação ao valor verdadeiro sempre inferior ao modelo com o mesmo parâmetro definido em 2. De notar que apesar da alteração do parâmetro, conseguiu-se fazer a medição de um total de oito cotas (Tabela 5.56) contra as sete do modelo obtido com as configurações por defeito, mas que na cota B não é possível de fazer qualquer medição devido ao ruído. As outras cotas possíveis de medir são as cotas F e I, com uma diferença em termos absolutos para o valor real de 0.34 mm e 2.11 respectivamente. Se estes valores fossem incluídos no somatório de diferenças, o mesmo totalizaria 5.66 mm de diferença, o que ainda é um valor inferior aos 7.89 mm do somatório do outro modelo. Portanto, pode-se desde já afirmar que um valor mais alto de *Tamanho de Célula* influencia positivamente o modelo final em termos de diferença dos valores das cotas e o número de cotas definidas.

Tabela 6.13 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 4 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Tamanho de Célula 2	Modelo Tamanho de Célula 5
A	33.11	0.33	0.15
C	17.49	1.16	0.35
G	61.93	1.86	0.89
K	35.30	1.06	1.00
L	60.05	0.87	0.18
M	35.59	2.61	0.84
Total [mm]		7.89	3.41
Tempo [min]		9.66	6.89

O Teste 5 compara as consequências que um aumento do parâmetro *Threshold* proporciona, mais precisamente do valor 0.7 para 0.9. Tal como o parâmetro *Tamanho de Célula*, alterando o valor de *Threshold* para um valor superior, permite obter um somatório de diferenças muito menor, sensivelmente metade (50.90%), e em menos 1.04 minutos (10.77%). Aumentando este parâmetro resulta também um modelo final com muito menos ruído envolvente, o que se pode tornar uma grande vantagem visto que é precisamente nas arestas e faces próximas da base da peça real que surge grande parte do mesmo, distorcendo mesmo por vezes a forma do modelo real e tornando impossível realizar a medição de cotas.

Tabela 6.14 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 5 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Threshold 0.7	Modelo Threshold 0.9
A	33.11	0.33	0.76
B	19.26	0.99	0.23
C	17.49	1.16	0.20
G	61.93	1.86	1.35
K	35.30	1.06	0.96
L	60.05	0.87	0.17
M	35.59	2.61	0.69
Total [mm]		8.88	4.36
Tempo [min]		9.66	8.62

Na Tabela 6.15 estão expostos os resultados das diferenças entre cotas medidas e reais para o modelo com o parâmetro *wsiz* seleccionado com o valor por defeito e o modelo com o mesmo parâmetro definido em 16. Apesar de se conseguir um modelo com diferenças menores – apenas a cota G apresenta uma diferença maior –, aumentar o valor do parâmetro implica também um tempo de processamento muito superior, 72.67%, o que pode representar uma contrariedade se se tiver a trabalhar com um projecto com um grande número de fotos e levar mesmo a que o modelo final não seja conseguido, visto que o tempo de processamento sugere que o esforço pedido ao equipamento é bastante elevado.

Tabela 6.15 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 6 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo <i>wsiz</i> 7	Modelo <i>wsiz</i> 16
A	33.11	0.33	0.03
B	19.26	0.99	0.78
C	17.49	1.16	0.55
G	61.93	1.86	2.30
K	35.30	1.06	1.18
L	60.05	0.87	0.29
M	35.59	2.61	1.64
Total [mm]		8.88	6.77
Tempo [min]		9.66	16.68

O parâmetro que se segue, *Número Mínimo de Imagens*, é de extrema importância no que se trata de obter um modelo o mais similar possível à peça verdadeira. Tal como referido no capítulo do procedimento do programa, se o parâmetro estiver definido para o valor 2, é possível que sejam criados pontos falsos, dependendo da qualidade da textura da peça. Ora o programa avalia também a qualidade da textura pela qualidade das fotos, o que pode implicar que um conjunto de fotografias de fraca qualidade permita o surgimento dos tais pontos falsos. Pelos dados recolhidos do Teste 7 (Tabela 6.16) pode-se verificar que para o mesmo conjunto de fotografias, aumentando o valor do parâmetro de 2 para 3 resulta numa redução de diferença entre o valor medido e o valor real em todas as cotas, e mais uma vez ao contrário do esperado, um menor tempo de processamento. A diferença de somatórios é menor em cerca de um terço do modelo obtido pelo valor de defeito, o que indica que a mais valia é substancial para a qualidade do modelo final, quer em termos de aproximação das cotas ao seu valor real (devido ao menor números de pontos falsos), quer em termos de tempo de processamento, que apesar de ser semelhante não traduz nenhuma contrariedade.

Tabela 6.16 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 7 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Número Mínimo de Imagens 2	Modelo Número Mínimo de Imagens 3
A	33.11	0.33	0.07
B	19.26	0.99	0.36
C	17.49	1.16	0.48
G	61.93	1.86	1.52
K	35.30	1.06	0.91
L	60.05	0.87	0.60
M	35.59	2.61	2.06
Total [mm]		8.88	6.00
Tempo [min]		9.66	9.54

Por último, em termos de testes da fase de *Densificação*, surge a comparação do único parâmetro do método MVE de possível análise, a *Largura de Filtro*. Pela Tabela 6.17 é desde logo possível afirmar que o aumento do valor de 5 para 9 não é viável, pois a um aumento de 119.73% no tempo de processamento há que se acrescentar um aumento de 24.08% no somatório de diferenças. Teoricamente, seleccionado um valor superior deveria resultar num modelo com melhores resultados, como referido no capítulo 4.2.1, no entanto seleccionando um valor 9 tal não se verificou.

É provável que o parâmetro ou não esteja otimizado (versão não final) ou que o valor seleccionado fosse demasiado grande, o que levou ao programa a originar um tamanho de *patch* (remendo) desadequado para as dimensões da figura.

Tabela 6.17 – Regard3D Densificação: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 8 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Largura de Filtro 5	Modelo Largura de Filtro 9
A	33.11	0.87	0.70
B	19.26	0.81	0.55
C	17.49	0.21	0.59
G	61.93	1.75	2.12
K	35.30	0.48	1.17
L	60.05	0.37	0.38
M	35.59	0.66	0.88
Total [mm]		5.15	6.39
Tempo [min]		21.95	48.23

6.2.4. Análise dos Resultados da Criação de Superfície

Dos cinco testes realizados para a fase de Criação de Superfície, três pertencem a parâmetros do método *Poisson Surface Reconstruction* e dois ao método *Floating Scale Surface Reconstruction*. Os modelos comparados no Teste 1, com o parâmetro *Samples per Node* de valores 1 e 13, têm as diferenças das medições das cotas em relação ao seu valor real registadas na Tabela 6.18, onde o modelo com o valor do parâmetro superior apresenta um somatório de diferenças menor, com o tempo de processamento quase inalterado.

Tabela 6.18 – Regard3D Superfície: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 1 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Samples per Node 1	Modelo Samples per Node 13
A	33.11	0.33	0.77
B	19.26	0.99	1.02
C	17.49	1.16	0.98
G	61.93	1.86	0.92
K	35.30	1.06	0.89
L	60.05	0.87	0.65
M	35.59	2.61	2.03
Total [mm]		8.88	7.26
Tempo [min]		9.66	9.63

O segundo teste indica que modificar o parâmetro *Point Weight* para o dobro do valor seleccionado por defeito, de 4 para 8, origina um modelo com um somatório de diferenças 32.77% inferior em sensivelmente o mesmo tempo de processamento. Assim, como este parâmetro especifica a importância da interpolação dos pontos de amostragem, o teste sugere que quanto maior for o peso da interpolação no cálculo da superfície mais exacto será o valor das dimensões das cotas do modelo final.

Tabela 6.19 – Regard3D Superfície: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 2 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Point Weight 4	Modelo Point Weight 8
A	33.11	0.33	0.00
B	19.26	0.99	0.21
C	17.49	1.16	0.29
G	61.93	1.86	1.88
K	35.30	1.06	1.08
L	60.05	0.87	0.30
M	35.59	2.61	2.21
Total [mm]		8.88	5.97
Tempo [min]		9.66	9.67

Visto que o parâmetro *Trim Threshold* é aquele que determina o excesso de superfície criada, e como o *Regard3D* acrescenta grandes áreas de superfície suplementares, para o Teste 3 são comparados três modelos com o valor mínimo possível (1), o valor médio e seleccionado por defeito (5) e o valor máximo possível (9). Pela Tabela 6.20 pode-se retirar a ilação que independentemente de um valor alto ou baixo do parâmetro, não é significativo o seu impacto no tempo de processamento. Na Figura 6.9 é possível observar os três modelos com os diferentes valores do parâmetro, e é claramente visível a diferença de áreas a rodear a forma da peça que vão diminuindo à medida que o parâmetro é aumentado, bem como os furos da mesma que não se encontram fechados no modelo de valor 9. Apesar de não ser possível retirar todo o ruído sem ferramentas adicionais de outros programas, é perceptível que parte da superfície que serve de base à peça está presente ao longo dos três modelos, é bastante útil seleccionar o valor máximo de forma a que o ruído criado seja diminuto.

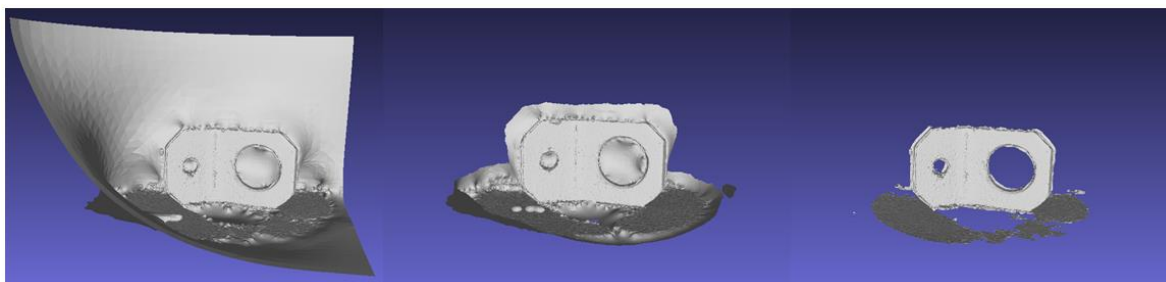


Figura 6.9 – Os Três Modelos Obtidos com Diferentes Valores de Trim Threshold (da esquerda para a direita: 1, 5 e 9 respectivamente)

Já em termos de diferenças entre os valores medidos e os valores reais, é o modelo com o menor valor de *Trim Threshold* que apresenta melhores resultados em relação aos restantes, mas, mesmo assim, o modelo com o parâmetro mais elevado consegue ter um somatório de diferenças inferior àquele que pertence ao modelo com a configuração intermédia (e por defeito). Ou seja, o valor por defeito é menos exacto mas apresenta uma porção de área envolvente que se encontra entre os dois outros modelos. O modelo com o parâmetro 9 tem duas cotas em particular, as cotas G e M, com uma diferença acima do que foi verificado nos restantes modelos. Ora essas cotas partilham uma aresta, o que pode indicar que a aresta em comum não está bem reconstruída, provavelmente devido ao *Trim Threshold* elevado, no entanto seria lógico o pensamento que se a área envolvente reduziu então a aresta tenha perdido alguns pontos. No entanto, os valores medidos das ditas cotas são superiores aos valores reais (Tabela 5.78), o que parece indicar o contrário, ou seja, que apesar de os pontos envolventes à forma da peça reduzirem, em algumas arestas são acrescentados pontos, mas apenas se o modelo final pudesse ser ter todo medido – pela Figura 6.10 é perceptível que o ruído continua bastante presente – é que seria possível retirar essa dedução com maior certeza.

Tabela 6.20 – Regard3D Superfície: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 3 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro		
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Trim Threshold 1	Modelo Trim Threshold 5	Modelo Trim Threshold 9
A	33.11	0.09	0.33	0.12
B	19.26	0.35	0.99	0.43
C	17.49	0.23	1.16	0.51
G	61.93	2.13	1.86	2.52
K	35.30	1.46	1.06	1.56
L	60.05	0.05	0.87	0.36
M	35.59	2.35	2.61	3.19
Total [mm]		6.66	8.88	8.69
Tempo [min]		9.88	9.66	9.97

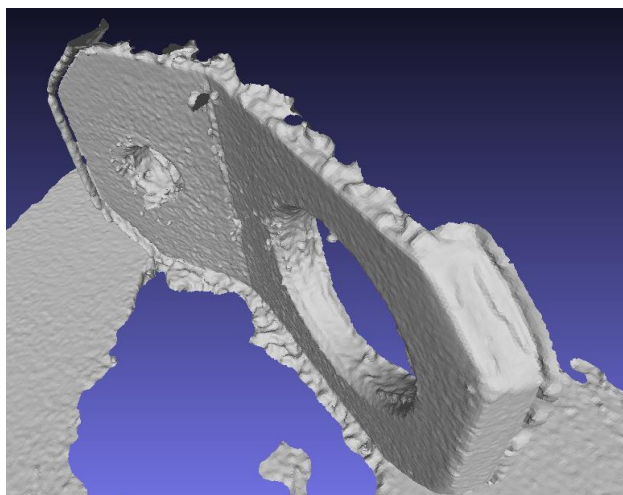


Figura 6.10 – Regard3D: Modelo com Ruído

Já dentro do método *Floating Scale Surface Reconstruction*, o Teste 4 compara modelos com o parâmetro *Confidence Threshold* diferentes. O modelo obtido com os parâmetros por defeito, referido anteriormente, tinha um tempo de execução muito elevado em comparação com os modelos obtidos por o outro método. Alterando o parâmetro *Confidence Threshold* de 1 para 10, do valor mínimo para o máximo, o resultado é um somatório de diferenças um pouco mais elevado, mas principalmente, um aumento do tempo de processamento em 40.36%. O parâmetro em questão limita os contornos da geometria da peça, mas como ilustra a Figura 6.11, o valor máximo seleccionado limita em demasiado, pois cria várias áreas vazias, em que a ausência de pontos leva que o modelo final pareça fragmentado.

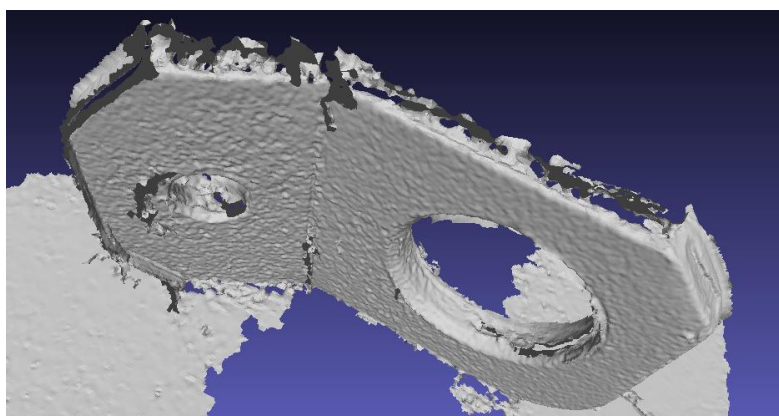


Figura 6.11 – Regard3D: Modelo Fragmentado

Tabela 6.21 – Regard3D Superfície: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 4 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Confidence Threshold 1	Modelo Confidence Threshold 10
A	33.11	0.87	1.44
B	19.26	0.81	0.90
C	17.49	0.21	0.25
G	61.93	1.75	2.25
K	35.30	0.48	0.74
L	60.05	0.37	0.15
M	35.59	0.66	0.16
Total [mm]		5.15	5.89
Tempo [min]		21.95	30.81

Tabela 6.22 – Regard3D Superfície: Diferenças entre os Valores dos Modelos do Teste 5 e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor de Referência [mm]	Modelo Minimum Component Size 1010	Modelo Minimum Component Size 4068
A	33.11	0.87	0.16
B	19.26	0.81	0.23
C	17.49	0.21	0.25
G	61.93	1.75	1.38
K	35.30	0.48	0.84
L	60.05	0.37	0.09
M	35.59	0.66	0.51
Total [mm]		5.15	3.46
Tempo [min]		21.95	28.89

O parâmetro *Minimum Component Size* é o alvo do último teste, com um aumento de 1010 para 4068, tendo como resultado um decréscimo de 32.82% no somatório das diferenças mas com um aumento de 31.62% no tempo de processamento. O ganho em termos de exactidão dos valores das cotas é equivalente ao investimento no tempo de processamento. Em termos de ruído, apesar das áreas envolventes à peça diminuírem, em certas zonas dá-se um aglomerado de forma quase cilíndrica de ruído (Figura 6.12).

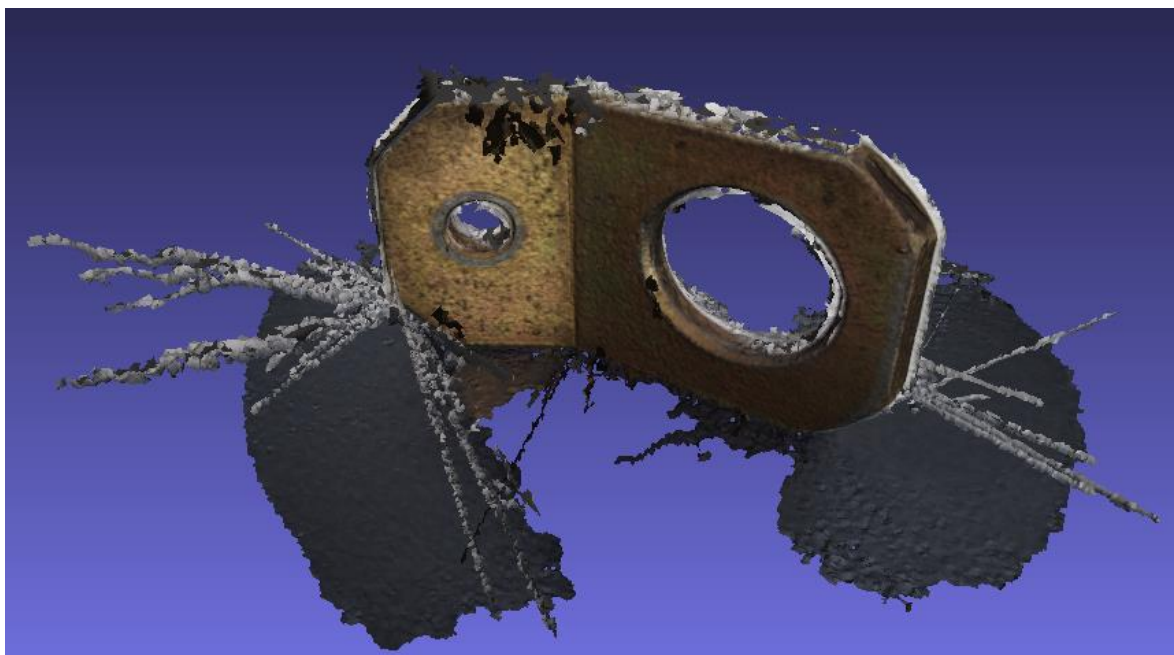


Figura 6.12 – Regard3D: Modelo com Ruído Aglomerado em Forma Cilíndrica

6.3. Construção dos Modelos das Peças B, C e D

Após a análise dos resultados para ambos os programas, os modelos das restantes peças são obtidos com base nos dados recolhidos. Assim, para os modelos reconstruídos pelo *PhotoScan*, a fase de *Alinhamento* é definida com 40 000 pontos-chave e 4000 pontos-nó com uma precisão *Elevada*, evitando que o processamento não seja interrompido por falta de memória do equipamento se fosse escolhida a precisão *Muito Elevada*, e com a pré-selecção dos pares desactivada. A *Construção da Nuvem Densa* é configurada com uma qualidade também *Elevada* e com o modo *Agressivo* para a *Filtragem de Profundidade*. Por fim, a *Construção do Modelo* tem como origem a nuvem densa e com uma contagem *Média* do número de faces, para que o modelo final seja facilmente aberto noutros programas, e com a opção de *Extrapolação* desligada. No *Regard3D*, os parâmetros seleccionados estão indicados na Tabela 6.23. Infelizmente, a Peça C não foi possível reconstruir de forma a que se pudesse medir alguma cota, principalmente devido ao ruído presente. Mesmo alterando os vários parâmetros e tirando novos conjuntos de fotografias, nunca o modelo final foi considerado aceitável, e como tal a Peça C apenas foi reconstruído pelo *PhotoScan*.

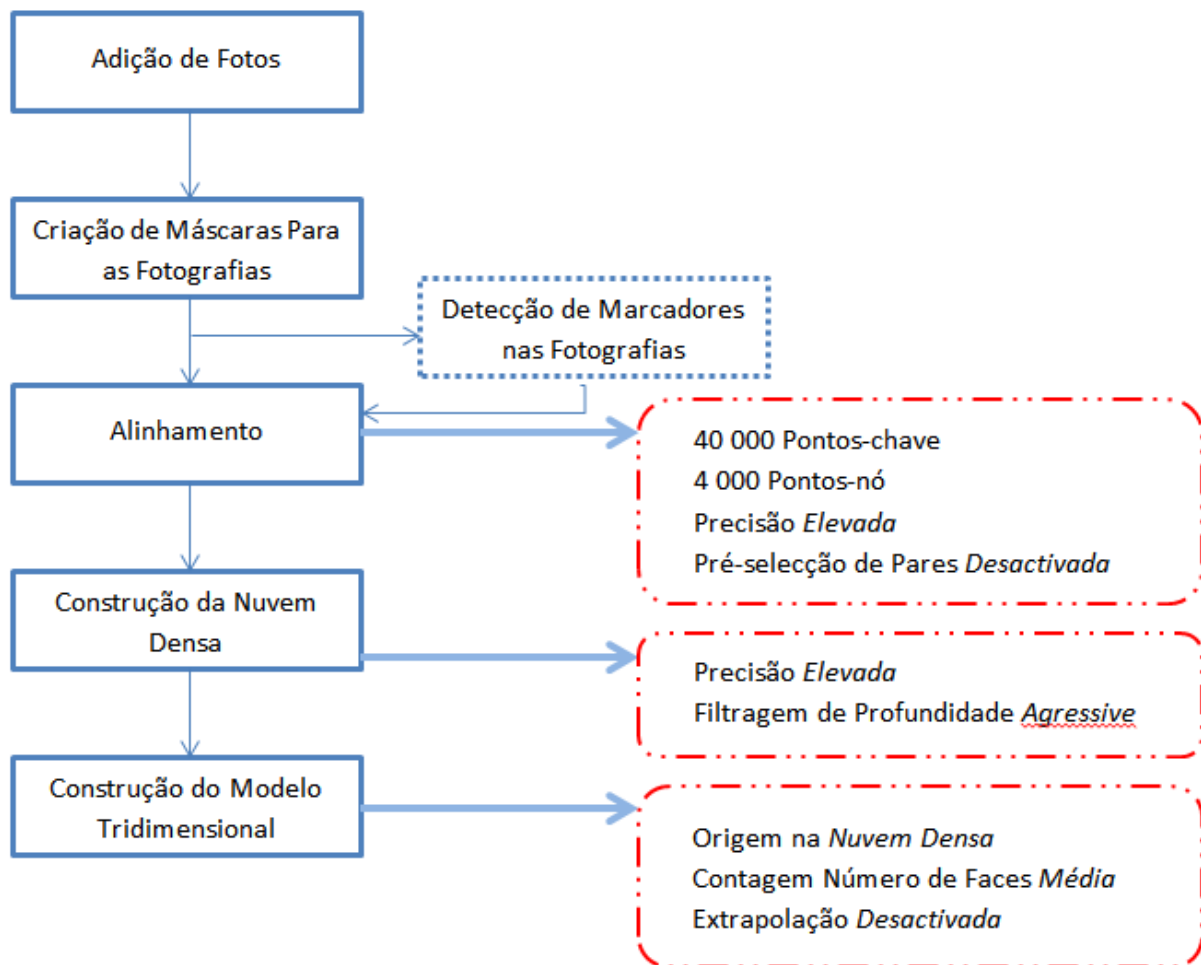


Figura 6.13 – PhotoScan: Parâmetros utilizados na Construção dos Modelos

Tabela 6.23 – Regard3D: Parâmetros Utilizados na Construção dos Modelos

Correspondências		Triangulação	Densificação		Superfície	
Keipoint Sensivity	High (0.0 005)	Incremental	CMVS/PMVS		Samples per Node	13
Keypoint Matching Ratio	High (0.8)	Refine Camara Intrinsics	Use Visibility Information	On	Point Weight	8
			Images per Cluster	500	Thrim Threshold	1
			Cell Size	5		
			Threshold	0.9		
			wsizer	7		
			Min. Image Number	3		

6.3.1. Peça B

A Peça B utilizou o maior número de fotografias, 113, e exigiu que fossem separadas em dois conjuntos para a reconstrução pelo *Regard3D*, pois o programa apenas consegue criar modelos num ângulo de 180°. Na Figura 6.14 é possível ver a peça real e os dois modelos tridimensionais, em que estes dois últimos são claramente reconhecíveis como representações da peça real, onde grande parte da superfície se encontra reconstruída. Neste caso, como existem várias zonas onde as fotografias iriam captar apenas sombra por causa das cavidades, optou-se por movimentar a câmara ao longo de uma metade e capturando a peça de vários ângulos, seguido o mesmo método para a outra metade. Deste modo, as áreas com buracos foram, na sua maioria, evitadas, aproximando os dois modelos à peça real.

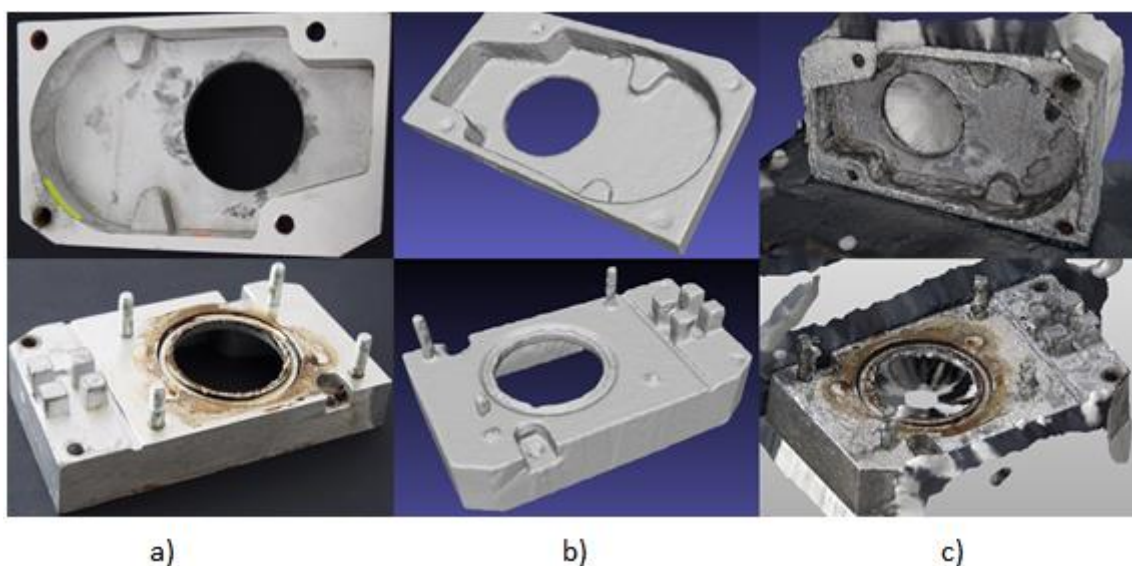


Figura 6.14 – Peça B: a) Peça Real; b) Modelo Obtido pelo PhotoScan e Já Convertido em Sólido; c) Modelo de Cada Metade da Obtido pelo Regard3D)

Como grande parte da peça foi modelada no *SolidWorks* através do recurso à importação de fotografias, e como com o paquímetro não é possível medir ângulos, as cotas seleccionadas para analisar a precisão do modelo não abrangem toda a peça. As mesmas são apresentadas na figura abaixo. Tal como já tinha sido referido para a Peça A, os modelos do *Regard3D* não permitem medir o mesmo número de cotas devido ao ruído e a áreas não reconstruídas. Assim, as cotas H, I, J, N e O não puderam ser medidas e os seus valores registados.

Na Tabela 6.24 estão calculadas as diferenças entre os valores medidos das cotas dos modelos e os valores da peça real medidos pelo paquímetro. Além das cinco cotas impossíveis de realizar qualquer medição, de relembrar que o modelo do *Regard3D* apenas corresponde a cerca de metade da peça, e o ruído é imenso comparado com o pouco verificado no modelo do *PhotoScan*.

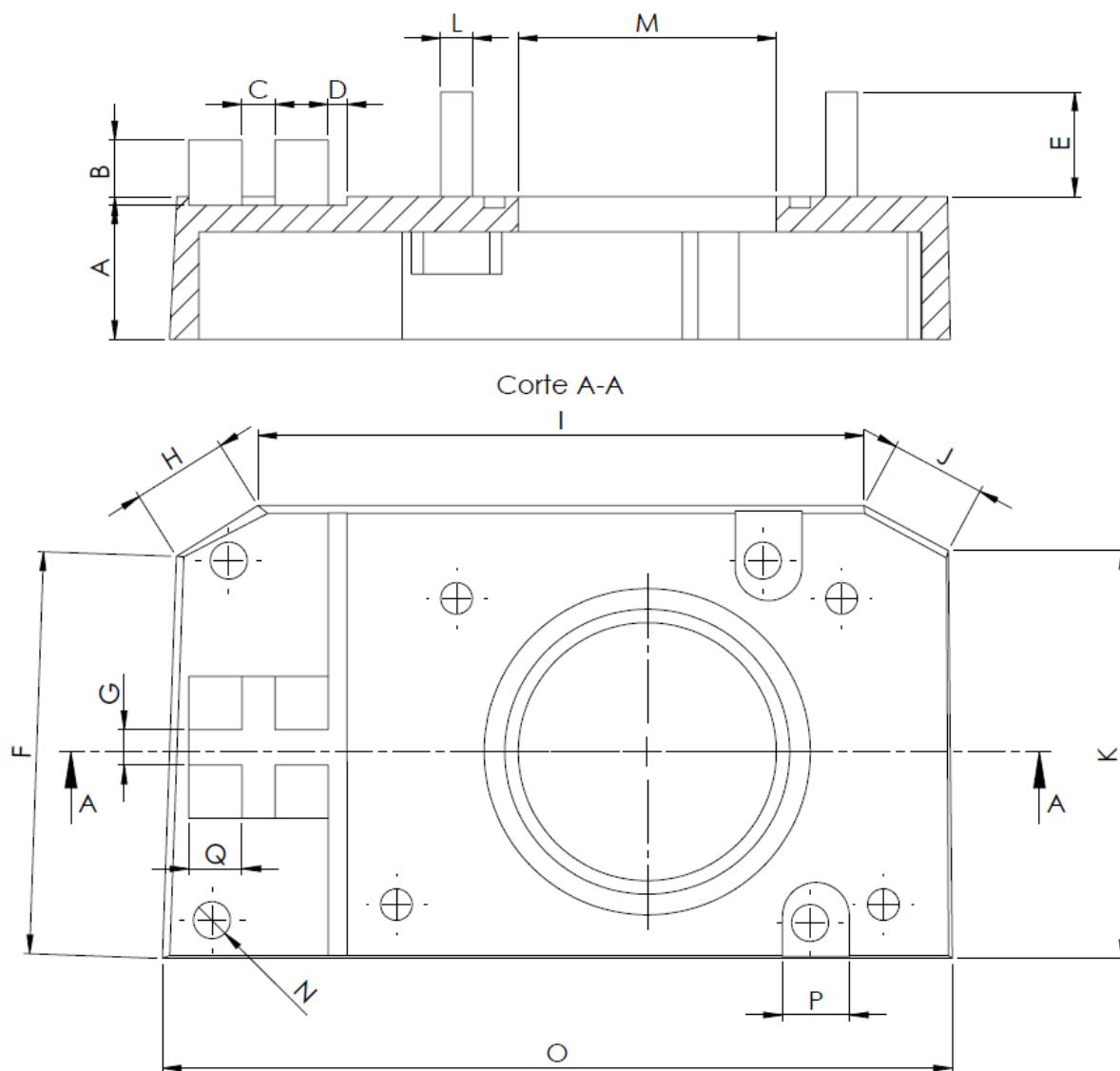


Figura 6.15 – Cotas da Peça B Seleccionadas para a Análise da Exactidão

Tabela 6.24 – Peça B: Diferenças entre os Valores dos 2 Modelos e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro			
Identificação	Valor Verdadeiro [mm]	Modelo PhotoScan		Modelo Regard3D	
A	25.19	0.65	-2.58%	1.02	4.05%
B	11.50	0.54	-4.70%	1.34	-11.65%
C	5.86	0.72	12.29%	1.43	-24.40%
D	3.31	0.94	28.40%	0.50	15.11%
E	18.50	1.06	-5.73%	0.27	1.46%
F	71.04	1.38	-1.94%	1.67	2.35%
G	6.26	0.22	-3.51%	0.71	11.34%
H	16.96	0.63	-3.71%	-	-
I	107.05	0.24	-0.22%	-	-
J	16.87	1.84	-10.91%	-	-
K	72.04	1.62	-2.25%	2.63	3.65%
L	5.59	1.50	-26.83%	1.00	-17.89%
M	45.59	0.20	-0.44%	1.21	2.65%
N	6.54	0.72	-11.01%	-	-
O	139.89	2.29	-1.64%	-	-
P	11.82	0.61	-5.16%	1.03	8.71%
Q	9.39	1.16	-12.35%	0.59	6.28%
Total [mm]		16.32		13.40	

6.3.2. Peça C

Tal como já mencionado, a Peça C não teve nenhum modelo obtido pelo Regard3D que permitiu realizar medições, pois não é claramente perceptível os limites da peça, visto que o ruído rodeia todo o modelo. Utilizando o PhotoScan, apenas usando os marcadores foi possível que o modelo tivesse toda a sua geometria definida. No entanto, devido a ser uma peça com uma espessura de apenas 2.46 mm, o modelo resultante não tem nenhuma espessura mensurável, e quando usada qualquer ferramenta de conversão para sólido, o modelo acaba por perder quase toda a sua superfície. No entanto é perceptível pela imagem abaixo que a restante geometria da peça é conservada, mas que o ruído acumulado é muito superior ao das restantes peças do PhotoScan.

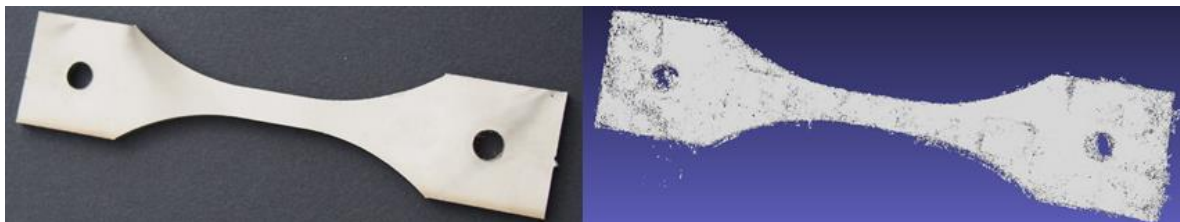


Figura 6.16 – Peça C: Peça Real e o Modelo Obtido pelo PhotoScan

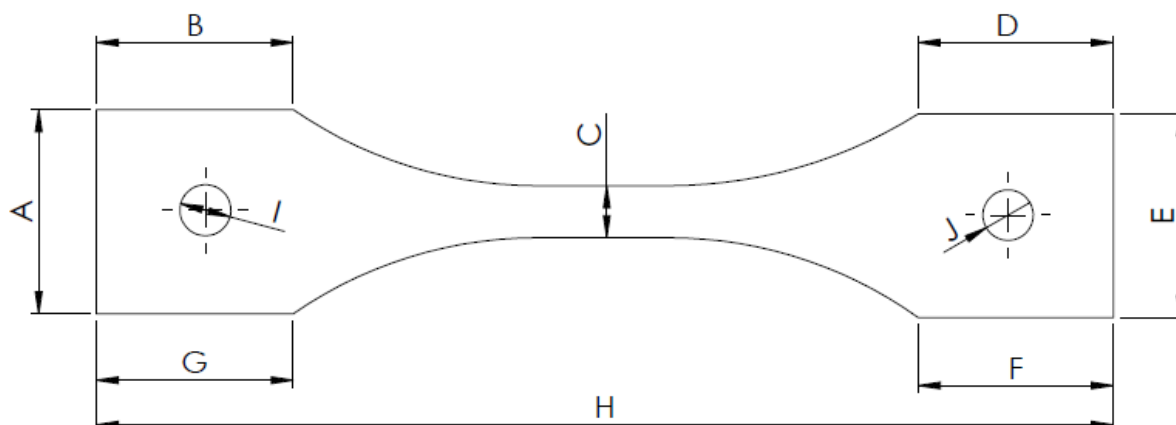


Figura 6.17 – Cotas da Peça C Seleccionadas para a Análise da Exactidão

As cotas da peça real medidas pelo paquímetro, excepto a correspondente à dimensão da espessura, foram comparadas com as cotas do modelo final. Se o modelo fosse sólido, as cotas do seu perímetro estariam melhor definidas, pois as arestas não estariam fragmentadas como ilustrado na Figura 6.18, e que dificultam imenso as medições. A remoção do ruído tem que ser feita com algum cuidado, pois estando as arestas fragmentadas, ou seja, várias pequenas faces não ligadas a nada, uma ferramenta de remoção automática poderá implicar que parte da superfície do modelo seja removida involuntariamente.

Tabela 6.25 – Peça C: Diferenças entre os Valores do Modelo e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro	
Identificação	Valor Verdadeiro [mm]	Modelo PhotoScan	
A	30.49	0.19	0.62%
B	29.74	1.53	-5.14%
C	7.79	0.01	0.13%
D	29.20	0.62	-2.12%
E	30.41	1.38	-4.54%
F	29.18	1.06	-3.63%
G	29.77	0.69	-2.32%
H	143.24	4.31	-3.01%
I	7.64	0.73	-9.55%
J	7.54	0.73	-9.68%
Total [mm]		11.25	

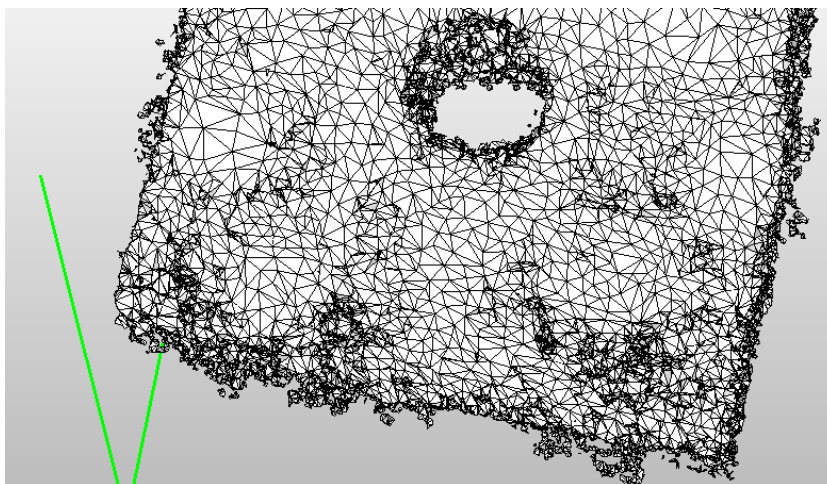


Figura 6.18 – Peça C: Arestas Fragmentadas

6.3.3. Peça D

A última peça partilha do mesmo problema verificado acima, ou seja, como a espessura é mais uma vez muito pequena, 1.08 mm, também o modelo obtido pelo *PhotoScan* não tem profundidade, mas as arestas já se encontram muito melhor definidas. Também não é possível transformar o modelo em sólido sem se perder a geometria da peça, mas ao contrário do modelo da Peça C, este modelo tem as suas arestas definidas e com muito pouco ruído. Não foi necessário o recurso a marcadores de qualquer género, e facilmente quer um quer outro programa conseguiram construir o modelo. Pelo *Regard3D* o resultado tem bastante ruído, principalmente ao longo das arestas, e em certas áreas o modelo tem grandes buracos, como mostrado em baixo. No entanto as medições continuam a ser possíveis de realizar.

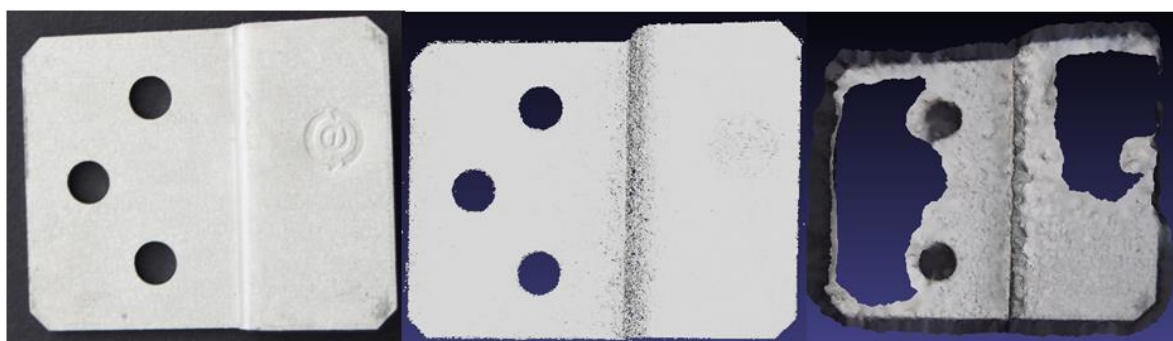


Figura 6.19 – Peça D: A Peça Real, o Modelo Obtido pelo PhotoScan e o Modelo Obtido pelo Regard3D (esq-dir)

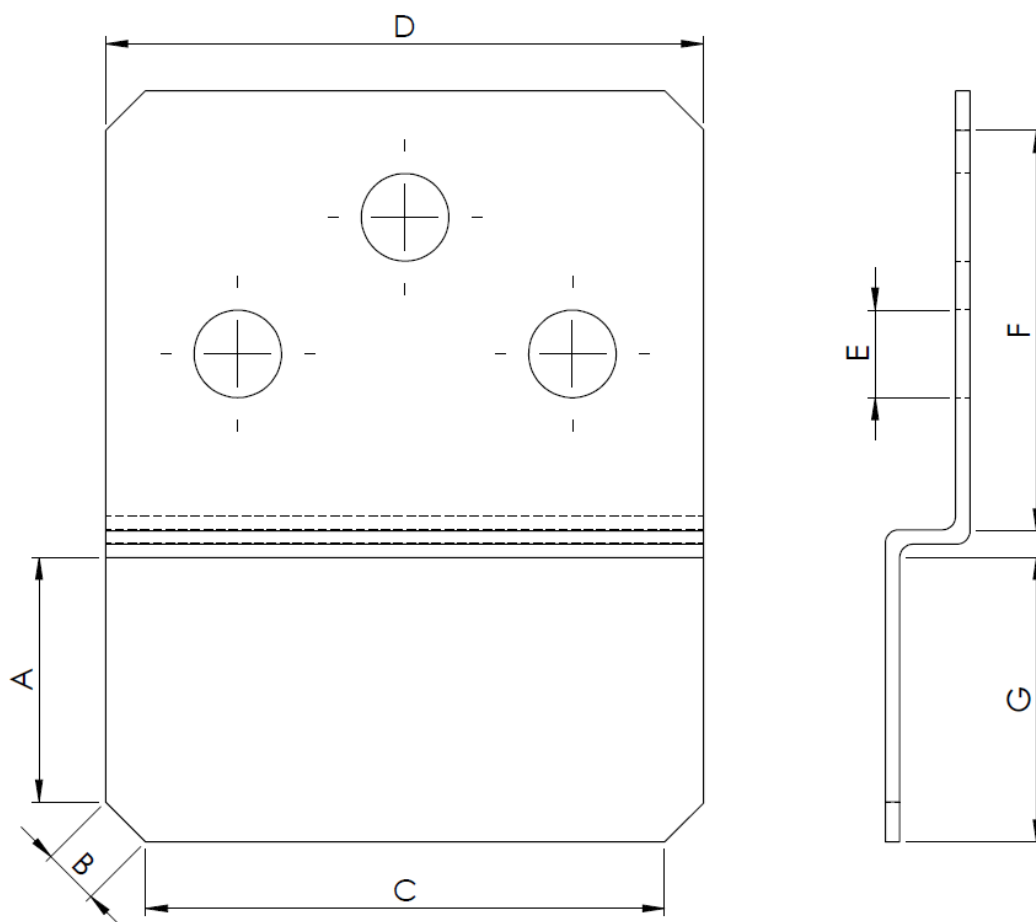


Figura 6.20 – Cotas da Peça D Seleccionadas para a Análise da Exactidão

Os modelos apresentam poucas cotas que possam ser comparáveis com os valores medidos pelo paquímetro, Tabela 6.26, mas em termos de exactidão, pelo somatório das diferenças os dois modelos são quase equivalentes. Mas como o modelo do *Regard3D* não é fechado, é muito menos similar à peça real D.

Tabela 6.26 – Peça D: Diferenças entre os Valores dos 2 Modelos e a Peça Real

Cota		Diferença [mm] entre o Valor Médio Medido e o Valor Verdadeiro			
Identificação	Valor Verdadeiro [mm]	Modelo PhotoScan		Modelo Regard3D	
A	18.37	1.08	-5.88%	0.24	-1.31%
B	4.24	0.00	0.00%	0.23	5.42%
C	39.04	1.24	-3.18%	2.44	6.25%
D	44.92	1.51	-3.36%	2.02	4.50%
E	6.58	0.13	-1.98%	0.25	3.80%
F	30.08	0.60	-1.99%	1.30	4.32%
G	21.37	1.06	-4.96%	0.06	0.28%
Total [mm]		5.62		6.54	

7. Conclusões

7.1. Conclusões Gerais

Com este estudo ficou comprovado que, com um equipamento de captura de fotografias e um software baseado no método *Structure from Motion* é possível reconstruir um modelo tridimensional de uma peça real. É no entanto necessário salientar que, por vezes, há que realizar mais que uma iteração para que o modelo final se aproxime, geometricamente, da peça verdadeira. Como o alvo destes dois programas utilizados, o *Agisoft PhotoScan* e o *Regard3D*, não são a reconstrução de objectos de reduzidas dimensões, os resultados de algumas das peças poderão não ser os pretendidos, tal como se verificou nas peças C e D, que por terem uma espessura consideravelmente pequena, respectivamente, 2.46 mm e 1.08mm, os modelos não possuem qualquer profundidade.

Nas peças A e B, já com uma dimensão superior, os resultados são bastantes satisfatórios, principalmente nos modelos obtidos pelo *PhotoScan*, conseguindo modelos completamente fechados. É aqui que surge a principal fraqueza do *Regard3D*, a impossibilidade de fazer uma reconstrução superior a um ângulo de 180°, ou seja, não é possível criar um modelo da peça real, uma vez que o sólido só é reconstruído parcialmente. A juntar a isso, há que ter em conta a grande quantidade de ruído. É claro que falta alguma optimização no funcionamento do programa, mas se o ruído não for uma desvantagem, este software trabalha bastante bem em termos de superfícies, sendo ainda para mais uma ferramenta disponível gratuitamente.

Um comando de remoção de ruído, particularmente nas fases finais, seria uma mais-valia, pois o *Regard3D* não tem essa funcionalidade, o que impossibilita a resolução de um problema identificado, pois o ruído vai sendo perceptível entre as várias etapas.

O *PhotoScan* além de possuir ferramentas de remoção do ruído, tem na sua ferramenta de criação de máscaras nas fotografias a característica principal que permite a obtenção de modelos completos. No entanto, é necessário investir muito tempo no tratamento das fotografias, e no caso de se tratar de um projecto com um grande número de fotografias, poderá tornar-se pouco viável. Apesar de neste estudo não estar testado a criação de um modelo sem máscara, um projecto sem a opção de máscara leva a que os resultados sejam também apenas uma representação de 180° da superfície da peça.

É seguro afirmar que, usando o *PhotoScan* na obtenção de um modelo final, com os parâmetros de selecção adequados e fazendo uso das respectivas ferramentas, é possível almejar uma reconstrução com alguma exactidão. Além dos parâmetros estarem seleccionados correctamente, há-que procurar capturar fotografias com a melhor qualidade possível, pois se as fotografias estiverem muito mal focadas ou que não cubram toda a área da peça real, é indicativo que o modelo final não será muito exacto.

Os desvios verificados entre as cotas de referência e os valores lineares medidos através dos programas computacionais, variam, em termos gerais, entre as centésimas de milímetro e os quatro milímetros – a maior diferença foi de 4.31 mm na cota de maior comprimento (143.24 mm) -, o que em situações em que as tolerâncias se enquadrem dentro dessa ordem, a aplicação da técnica *Structure from Motion* em componentes mecânicos é viável.

Pelos resultados das medições dos valores dos volumes e áreas dos modelos completos (apenas os conseguidos pelo *PhotoScan*) por meio das ferramentas dos programas, os modelos encontram-se bastantes próximos do modelo reconstruído pela medição das cotas com o paquímetro. Para os modelos completos, o volume varia entre os 40.1576 cm³ e os 44.0586 cm³, e a área total da superfície entre os 132.0325 cm² e os 139.1861 cm², não muito longe dos 38.6590 cm³ e 130.0475 cm², respectivamente, calculados pelo *SolidWorks* através do sólido com as cotas medidas pelo paquímetro. Esta pequena discrepância entre valores poderá ser consequência quer do ruído presente (sendo acrescentado pontos não pertencentes à peça real), quer da reconstrução feita nas zonas onde existe ausência de informação.

7.2. Futuros Trabalhos

Com base neste trabalho realizado, poderá ser interessante ir acompanhando as novas versões dos softwares utilizados, que com certeza, irão trazer melhorias e a adição de novas ferramentas, na esperança de que peças com pouca espessura e com diferentes superfícies consigam ser transformadas em sólido. Além de que, principalmente no *Regard3D* – que ainda não é uma versão final –, os parâmetros que, neste momento, não permitiram obter nenhum resultado concreto poderão possibilitar outro tipo de soluções.

Outro alvo de um projecto posterior, poderá ser a articulação do método *Structure from Motion* com outro método de obtenção de dados tridimensionais, de forma a que o modelo obtido consiga ser o resultado de pontos mais exactos, levando a que a diferença de valores das cotas entre modelos tridimensionais e peças reais seja reduzida. Ainda como hipótese, procurar otimizar os parâmetros de selecção para cada tipo de material e condições de luminosidade da fotografia.

Bibliografia

1. Eilam, E., *Reversing: Secrets of Reverse Engineering*. 2005, Indianapolis, Indiana: Wiley Publishing Inc.
2. Varady, T., R.R. Martin, and J. Cox, *Reverse Engineering of Geometric Models - An Introduction*. 1996.
3. Messler Jr, R.W., *Reverse Engineering Mechanisms, Structures, Systems & Materials*. 2014, Nova York: McGraw.Hill Education.
4. Systemes, D., *Khufu Reborn*. 2006.
5. Creaform, *Reverse Engineering of Physical Objects - Teaching Manual*. 2014.
6. Karsnitz;, J.R., S. O'Brien;, and J.P. Hutchinson, *Engineering Design: An Introduction*. Second Edition ed. 2013, Clifton Park, Nova York: Delmar Cengage Learning.
7. Vernon, D., *Machine Vision: Automated Visual Inspection and Robot Vision*. 1991, Hemel Hempstead: Prentice Hall.
8. Johnson, A.E. and M. Hebert, *Control of Polygonal Mesh Resolution for 3-D Computer Vision*. Graphical Models and Image Processing, 1998. **60**(4).
9. Kovács, I., T. Várady, and P. Salvi, *Applying geometric constraints for perfecting CAD models in reverse engineering*. Graphical Models, 2015.
10. Raja, V.I.F., Kiran J, *Reverse Engineering: An Industrial Perspective*. 2008, Londres: Springer.
11. Valkenburg, R.J. and A.M. McIvor, *Accurate 3D measurement using a structured light system*. Image and Vision Computing, 1998. **16**: p. 99-110.

12. Jain, R., R. Kasturi, and B.G. Schunck, *Machine Vision*. 1995, Nova York: McGraw-Hill.
13. Klette, R., K. Schlüns, and A. Koschan, *Computer Vision*. 1998, Singapore: Springer-Verlag.
14. Sharpe Jr., W.N., *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. 2008, Nova York: Springer.
15. Watanabe, M. and S.K. Nayar, *Rational Filters for Passive Depth from Defocus*. International Journal of Computer Vision, 1997. **27**(3): p. 203 - 225.
16. Aydin, T. and Y.S. Akgul, *A New Adaptive Focus Measure for Shape From Focus*. 2008: p. 8.1-8.10.
17. Watanabe, M., S.K. Nayar, and M. Noguchi, *Real-Time Computation of Depth from Defocus*. Proceedings of The International Society for Optical Engineering (SPIE), 1996. **2599**: p. 14 - 25.
18. Nayar, S.K., M. Watanabe, and M. Noguchi, *Real-Time Focus Range Sensor*, in *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 1995. p. 995 - 1001.
19. Shirai, Y., *Three-Dimensional Computer Vision*. 1987, Berlim: Springer-Verlag.
20. Mehring, M. and V.A. Weberruss, *Object-Oriented Magnetic Resonance: Classes and Objects, Calculations and Computations*. 2001: Academic Press.
21. Manganelli, M., *Measuring the Real World with High-Performance Scanning Systems*, in *Quality Digest*. 2000. p. 37 - 41.
22. Giri, D., M. Jouaneh, and B. Stucker, *Error sources in a 3-D reverse engineering process*. Precision Engineering, 2004. **28**(3): p. 242-251.
23. Jebara, T., A. Azarbajejani, and A. Pentland, *3D Structure From 2D Motion*. IEEE Signal Process. Mag. 3D Stereosc. Visual Commun, 1999. **16**(3): p. 66-84.
24. Varga, M., *Practical Image Processing and Computer Vision*. 2009, Austrália: John Wiley & Sons Australia.
25. Tell, D., *Wide Baseline Matching with Applications to Visual Servoing*, in *Numerical Analysis and Computing Science*. 2002, Royal Institute of Technology: Estocolmo. p. 1541–7283–254–1.
26. LLC, A., *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.2*. 2016.
27. Chatterjee, A. and V.M. Govindu, *Efficient and Robust Large-Scale Rotation Averaging*. 2013: p. 521-528.

28. Martinec, D., *Robust Multiview Reconstruction*, in *Department of Cybernetics*. 2008, Czech Technical University: Prague.
29. Moulon, P., P. Monasse, and R. Marlet, *Global Fusion of Relative Motions for Robust, Accurate and Scalable Structure from Motion*, in *International Conference on Computer Vision*. 2013: Sydney.
30. Wilson, K. and N. Snavely, *Robust Global Translations with 1DSfM*, in *European Conference on Computer Vision*. 2014: Zurich.

Anexos

Tabela 0.1 – Peça A: Resultados das Correspondências (40 000/1000)

Pontos-Chave	40 000
Pontos-Nó	1000

	Pontos			
Precisão	Média	Mínimo	Máximo	Sucesso
Muito Elevada	7049	6864	7162	100%
Elevada	8467	8341	8576	100%
Média	11116	11035	11178	100%
Baixa	4634	4396	5373	0%
Muito Baixa	649	641	662	0%

Tabela 0.2 - Peça A: Resultados das Correspondências (100 000/1000)

Pontos-Chave	100 000
Pontos-Nó	1000

	Pontos			
Precisão	Média	Mínimo	Máximo	Sucesso
Muito Elevada	5561	5444	5658	100%
Elevada	8344	8113	8590	100%
Média	11049	10971	11157	100%
Baixa	4965	4388	5434	60%
Muito Baixa	625	607	663	0%

Tabela 0.3 - Peça A: Resultados das Correspondências (Máximo/1000)

Pontos-Chave	Máximo
Pontos-Nó	1000

	Pontos			
Precisão	Média	Mínimo	Máximo	Sucesso
Muito Elevada	5307	5250	5387	100%
Elevada	8544	8405	8766	100%
Média	11070	10968	11126	100%
Baixa	4530	3490	5435	20%
Muito Baixa	651	616	678	0%

Tabela 0.4 - Peça A: Resultados das Correspondências (40 000/4000)

Pontos-Chave	40 000
Pontos-Nó	4000

	Pontos			
Precisão	Média	Mínimo	Máximo	Sucesso
Muito Elevada	57962	57842	58171	100%
Elevada	48968	48850	49122	100%
Média	23476	23402	23592	100%
Baixa	4650	4420	5409	0%
Muito Baixa	651	605	688	0%

Tabela 0.5 - Resultados das Correspondências (100 000/4000)

Pontos-Chave	100 000
Pontos-Nó	4000

	Pontos			
Precisão	Média	Mínimo	Máximo	Sucesso
Muito Elevada	51653	51443	51928	100%
Elevada	48988	48917	49055	100%
Média	23532	23468	23614	100%
Baixa	4838	4168	5235	40%
Muito Baixa	628	609	662	0%

Tabela 0.6 - Resultados das Correspondências (Máximo/4000)

Pontos-Chave	Máximo
Pontos-Nó	4000

Precisão	Pontos			Sucesso
	Média	Mínimo	Máximo	
Muito Elevada	49933	49802	50062	100%
Elevada	48917	48775	49072	100%
Média	23518	23397	23573	100%
Baixa	4587	4158	5407	20%
Muito Baixa	609	568	662	0%

Tabela 0.7 - Características do Equipamento Utilizado

Modelo	HP ProDesk 490 G2 MT
Processador	Intel Core i7-4790 CPU 3.60GHz
RAM	12 GB
Tipo de Sistema	64 bits

Tabela 0.8 – Peça A: Tempos de Correspondências e Alinhamento

Pontos-Chave	40 000	100 000	Máximo	40 000	100 000	Máximo
Pontos-Nó	1000	1000	1000	4000	4000	4000

Precisão	Tempo [min]					
	Matching					
Muito Elevada	16.17	29.18	33.30	16.45	29.20	33.36
Elevada	6.03	6.03	6.05	6.03	6.03	6.05
Média	1.63	1.65	1.63	1.65	1.63	1.63
Baixa	0.67	0.68	0.67	0.67	0.67	0.67
Muito Baixa	0.43	0.43	0.45	0.42	0.43	0.43

Precisão	Alignment					
Muito Elevada	0.12	0.10	0.12	0.54	0.49	0.51
Elevada	0.17	0.13	0.15	0.47	0.42	0.47
Média	0.20	0.17	0.22	0.22	0.23	0.30
Baixa	0.12	0.13	0.12	0.15	0.13	0.15
Muito Baixa	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03

Precisão	Total					
Muito Elevada	16.28	29.28	33.42	16.99	29.69	33.87
Elevada	6.20	6.17	6.20	6.50	6.45	6.52
Média	1.83	1.82	1.85	1.87	1.87	1.93
Baixa	0.78	0.82	0.78	0.82	0.80	0.82
Muito Baixa	0.45	0.45	0.47	0.45	0.45	0.47

